

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт нефти и газа  
Кафедра технологических машин и оборудования нефтегазового комплекса

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ Э.А. Петровский  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_ г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

21.03.01.07 Эксплуатация и обслуживание технологических объектов  
нефтегазового комплекса

Снижение усталостного износа подшипников качения кронблока  
применением модифицированных смазочных материалов.

Руководитель \_\_\_\_\_ доцент, к.т.н. С.Г. Докшанин

Выпускник \_\_\_\_\_ П.П. Павелко

Красноярск 2017

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Снижение усталостного износа подшипников качения кронблока применением модифицированных смазочных материалов» содержит 87 страниц текстового документа, 45 использованных источников, 2 листа графического материала.

КРОНБЛОК, ПОДШИПНИКИ КАЧЕНИЯ, ИЗНОС ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ, УСТАЛОСТНЫЙ ИЗНОС, ПОВЫШЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ, МОДИФИЦИРОВАННЫЙ СМАЗОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ.

Объект работы – подшипники качения.

Цель работы: повышение срока службы подшипниковых опор кронблока модифицированными смазочными материалами.

Задачи работы:

- информационный и патентный поиск по тематике работы, анализ причин выхода из строя подшипниковых узлов;
- анализ методов повышения срока службы подшипниковых узлов;
- анализ существующих материалов, применяемых в качестве функциональных добавок к смазочным материалам;
- расчет напряжений и давлений в зоне контакта подшипника;
- оценка режима работы подшипникового узла кронблока, на основании которой принимается решение по использованию модифицированного смазочного материала.

В результате работы было изучено влияние процессов усталости на работу подшипников качения кронблока, выявлены наиболее эффективные добавки к пластичным смазочным материалам, снижающие усталостный износ и повышающие срок службы подшипников качения.

В итоге были рассчитаны долговечность подшипника качения и режим смазки, на основании чего было принято решение по использованию модифицированного смазочного материала.

# СОДЕРЖАНИЕ

## Введение 5

1 Исследование вопросов долговечности подшипниковых опор кронблока.....	7
1.1 Устройство и условия эксплуатации кронблока.....	7
1.2 Подшипниковая опора кронблока.....	10
1.3 Причины выхода из строя подшипниковых опор кронблока.....	12
1.4 Методы повышения срока службы подшипников качения.....	17
1.4.1 Общие методы повышения долговечности .....	17
1.4.2 Модифицированный смазочный материал.....	22
1.5 Смазочные материалы с ультрадисперсными добавками.....	38
1.6 Вывод по главе 1.....	44
2 Влияние усталостных процессов на долговечность подшипников качения ...	45
2.1 Понятие механической усталости.....	45
2.2 Механизм усталостного разрушения.....	47
2.3 Виды усталостных разрушений.....	50
2.4 Влияние сил трения на процессы усталости.....	56
2.5 Вывод по главе 2.....	61
3 Расчеты подшипника качения при смазывании пластичными смазочными материалами.....	62
3.1 Расчет площади контакта ролик/кольцо.....	62
3.2 Расчет режима смазки подшипника качения.....	73
3.3 Расчет долговечности подшипника качения.....	75
3.4 Вывод по главе 3.....	79
Заключение.....	80

Список использованных источников.....	83
---------------------------------------	----

## ВВЕДЕНИЕ

Талевый механизм или талевая система — грузонесущая часть буровой установки — представляет собой полиспаст, состоящий из кронблока и талевого блока, огибаемых стальным канатом.

Кронблок — неподвижная часть талевой системы, предназначен, в основном, для проведения спускоподъемных операций.

Основными деталями кронблока являются: рама, ось, шкивы, закрепленные на конических роликоподшипниках, кожух для защиты.

Долговечность машины зависит от совокупности влияния разнообразных факторов, которые проявляются на всех этапах ее создания и эксплуатации. Так же долговечность машины зависит от каждого ее элемента и детали. Долговечность кронблока в большей степени зависит от состояния шкивов и их канавок, а так же подшипников, так как они испытывают большие реверсивные нагрузки. Подшипники подвергаются большому износу, и в работе будет рассмотрено повышение их долговечности.

Подшипниковые узлы являются важнейшими структурными составляющими машин. Как правило, потеря работоспособности машин происходят из-за отказов подшипниковых узлов.

Преимуществом использования подшипников качения является малый коэффициент трения, пониженный расход смазочного материала и упрощенная система смазки. Конструкция подшипников качения позволяет изготавливать их как общедоступную стандартную продукцию с полной взаимозаменяемостью, что естественно значительно снижает стоимость при производстве. Подшипники качения можно применять в широком диапазоне температур и при больших нагрузках.

Причины выхода подшипников из строя могут быть самыми разными: высокие нагрузки, неэффективные уплотнения, а следовательно, загрязнение, дефекты при монтаже, неудовлетворительное смазывание или неправильно подобранный смазочный материал.

Наиболее часто повреждения связаны с нормальным процессом усталости.

Износостойкость подшипниковых узлов трения, во многом определяется качеством и свойствами применяемого смазочного материала, параметрами контактирующих поверхностей деталей, и физико-механическими свойствами поверхностного слоя, а так же характером эксплуатационных режимов работы.

Недостаточная износостойкость подшипниковых узлов трения вызывает отказы, которые возникают при наработках от 30 до 60% от общей наработки до предельно состояния машины или механизма в целом. Вследствие этого совершенно необходимо повышать ресурс работы подшипников качения.

Повышение ресурса работы подшипников качения связано со снижением их усталостного износа. Одним из вариантов решения этой задачи является улучшение качества применяемых смазочных материалов за счет введения в их состав высокоэффективных твердых добавок.

Влияние смазочного материала на повышение срока службы подшипников качения отражено в работах Д.Н. Гаркунова, Д.С. Коднира, В.И. Пинегина, В.В. Синицына и других.

Актуальность представленной темы состоит в том, что работа машин и механизмов невозможна без использования подшипниковых опор, количество которых в механизмах велико, а повышение их срока службы необходимо для повышения надежности машин и механизмов.

Улучшение эксплуатационных показателей применяемых смазочных материалов в настоящее время является наиболее развивающимся и эффективным методом повышения срока службы подшипников на стадии эксплуатации. Вследствие этого, целью данной работы является снижение усталостного износа подшипников качения кронблока за счет применения смазочного материала с различными добавками.

# **1 Исследование вопросов долговечности подшипниковых опор кронблока**

## **1.1 Устройство и условия эксплуатации кронблока**

Буровая установка представляет собой целый автономный комплекс оборудования, обеспечивающий сооружение ствола, соединяющего земную поверхность с пластами, содержащего углеводородное сырье.

Талевая система буровых установок является одним из важнейших и ответственных узлов, обеспечивающих надежное опускание и подъем бурильных и обсадных колонн. С помощью талевой системы вращательное движение от барабана лебедки преобразуется в поступательное движение, совершаемое подвешенным грузом. Талевая система служит так же для уменьшения натяжения рабочей ветви каната, по сравнению с поднимаемым грузом – уменьшения нагрузки на ветви каната.

Кронблоки устанавливают на самую верхнюю площадку буровой вышки, называемой наголовником, чтобы с его помощью выполнять погрузочно-разгрузочные работы, фиксировать на определённой высоте инструмент или обсадные трубы, выполнять подъёмно-спусковые и технологические операции при бурении скважин. Они являются неподвижной частью талевого механизма.

Кронблок представляет собой устройство, направляющее канат от подъемного барабана к талевому блоку. Кронблок неподвижно закреплен в верхней части вышки. Он имеет несколько шкивов, смонтированных на неподвижном валу. Ось кронблока – это стержень, сделанный из прочного металла, на который насажены шкивы. Шкив кронблока – это колесо, закреплённое на неподвижной оси, которое передаёт усилия канату.

Оснащение кронблока и талевого блока шкивами называется оснасткой, от кратности оснастки зависит диаметр и длина используемого каната, а так же кинематика и нагрузка всей подъемной части бурового комплекса. Талевый канат навивается последовательно на шкивы кронблока и талевого блока,

причем неподвижный конец идет на зажимное устройство крепления мертвого конца.

Конструкция и принцип работы кронблоков разной грузоподъемности принципиально не отличается – изменяется только число канатных шкивов, количество и расположение осей, в зависимости от типа используемой вышки, объема спускоподъемных операций и действующей нагрузки. Диапазон грузоподъемности кронблоков составляет 200 – 600 тонн. Рассмотрим несколько кронблоков производства Уралмашзавода.

Кронблок УКБ-7-320 имеет две трехблочные секции и одну одноблочную, которая установлена на раме кронблока перпендикулярно к трехблочным секциям. На блок, установленный перпендикулярно к трехблочным секциям, идет ходовая ветвь талевого каната. В данном кронблоке так же есть подвесные вспомогательные блоки. Трехблочные секции закрыты кожухами для защиты. Блоки смонтированы на осях, укрепленных в разъемных опорах [1].

Кронблок УКБ-6-250 аналогичен кронблоку УКБ-7-320, от которого отличается только кинематической схемой. Кроме того, в этом кронблоке есть стационарно установленные вспомогательные блоки.

В рамах кронблоков УКБ-7-320, УКБ-6-250 снизу предусмотрены опоры, которые приваривают к опорным элементам вышки.

Каждая секция шкивов состоит из оси, на которой установлены шкивы, вращающиеся на роликоподшипниках. В зависимости от грузоподъемности кронблока шкивы устанавливают на двух роликовых либо сдвоенных подшипниках с коническими роликами. Сдвоенные подшипники качения имеют общее наружное кольцо и два внутренних. Между подшипниками соседних шкивов на оси имеются распорные кольца, которые исключают трение ступиц смежных шкивов, вращающихся с различной частотой. Между наружными кольцами роликоподшипников в ступицах шкивов установлены разрезные пружинные кольца, а на оси — распорные кольца с проточкой и отверстиями для выхода смазки к подшипникам [1, 2].



Для смазки подшипников, установленных в шкивах, в оси в зависимости от числа шкивов на оси выполнены продольные сквозные отверстия, имеющие выход на цилиндрическую поверхность к распорным кольцам. Смазываются подшипники смазкой Литол 24 по ГОСТ 21150-87. Не допускается нагрев подшипников свыше  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , так как при высокой температуре смазка теряет свои свойства. Для сохранения смазки и защиты подшипников от загрязнения используются фланцевые крышки, закрепленные на ступицах шкивов [2].

К раме кронблока подвешены вспомогательные блоки для троса, идущего от вспомогательной лебедки или от других специальных устройств.

Кронблоки КБН предназначены для работы в районах с умеренным климатом, типа КБ – в умеренном и холодном климате.

На рисунке 1 показана конструкция шестишкивного кронблока УКБ-6-250. У - конструкция Уралмашзавода; КБ - кронблок; 6 - количество шкивов; 250 - грузоподъемность в тоннах.



Рисунок 1 – Кронблок УКБ 6-250

Этот кронблок имеет сварную стальную раму, на которой укреплена ось с шестью шкивами, смонтированными на подшипниках. Такое конструктивное решение обеспечивает прочность, жесткость и удобство обслуживания. В

таблице 1 приведены основные характеристики кронблока УКБ-6-250. На листе 1 графической части приведен чертеж общего вида кронблока УКБ 6-250.

Таблица 1 – Характеристики кронблока УКБ-6-250

Характеристика	Значение
Допускаемая нагрузка (ГОСТ 16293-89), кН	2500
Число канатных шкивов	6
Канавки обработаны под канат диаметром, мм	28
Наружный диаметр шкива, мм	1000
Диаметр шкива по дну канавки, мм	900
Диаметр оси шкива, мм	220
Номер подшипника шкива	97744Л
Размеры подшипника, мм	220x340x100
Число подшипников в шкиве	1
Габаритные размеры, мм	
длина	3180
ширина	2606
высота	1335
Масса, кг	3885

Кронблок работает при больших нагрузках и различных погодных условиях. Кронблок, как и все оборудование буровой установки, имеет нестационарный режим нагружения, поэтому подшипники качения, установленные в кронблоке, работают с изменяющимися нагрузками и частотами вращения [3].

## 1.2 Подшипниковая опора кронблока

Безотказная работа кронблока во многом определяется применяемыми в их конструкции подшипниковыми узлами.

В данном кронблоке УКБ-6-250 применены роликовые радиально-упорные подшипники 97744Л с коническими роликами. Ролик конический предназначен для работы в высоконагруженных узлах при комбинированном восприятии радиальной и осевой нагрузок [4]. Технические характеристики подшипника представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики подшипника 97744Л

Характеристика	Значение
Внутренний диаметр, мм	220,00
Внешний диаметр, мм	340,00
Ширина, мм	99,00/75,00
Масса, кг	29,30
Марка стали	ШХ-15
Количество роликов в подшипнике, шт	52
Размеры ролика, мм	27,02/28,00x28,10
Грузоподъемность динамическая, кН	770,00
Грузоподъемность статическая, кН	1390,00
Номинальная частота вращения при жидкой смазке, об/мин	830,00
Номинальная частота вращения при пластичной смазке, об/мин	600,00

Название основных отличительных особенностей радиально-упорного конического роликового подшипника представлены на рисунке 2.

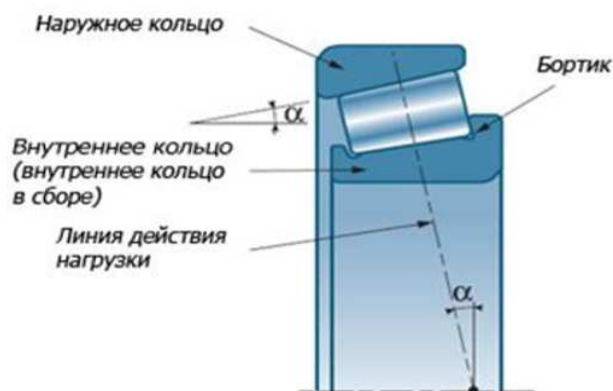


Рисунок 2 – Особенности радиально-упорного конического роликового подшипника

Подшипники качения являются слабым местом кронблока. Они работают высоких нагрузках и в режиме реверсивного движение, в результате этого они часто выходят из строя. Подшипник должен удовлетворять следующему ряду требований:

- прочность опоры,
- жесткость узла,
- точность вращения,
- обеспечение минимального сопротивления при вращении и при трогании с места,

- работа без чрезмерного нагрева,
- бесшумность,
- отсутствие заедания и заклинивания,
- удобство смазки, монтажа и демонтажа, а так же возможность замены подшипника другим за счет стандартизованных размеров посадочных мест.

Каждый подшипник качения выходит из строя при появлении выбраковочных признаков - несоответствия вышеперечисленным требованиям. Причиной появления большинства выбраковочных признаков является износ.

### **1.3 Причины выхода из строя подшипниковых опор кронблока**

Проблема износа машин и механизмов во многом связана с трением. Трение и изнашивание представляют собой механические явления, однако в их основе лежат сложные физические и химические процессы. Трение имеет двойственную молекулярно-механическую природу. И.В. Крагельский [5] сформулировал три последовательных и взаимосвязанных этапа процесса трения, а именно:

- 1) взаимодействие поверхностей с учетом влияния среды;
- 2) изменение поверхностных слоев в результате взаимодействия с учетом влияния окружающей среды;
- 3) разрушение поверхностей (износ) вследствие двух предыдущих этапов.

Трение сопровождается изнашиванием контактирующих деталей, а результатом изнашивания является износ.

С механической точки зрения изнашивание есть процесс разрушения тонких поверхностных слоев в области фрикционного контакта двух взаимодействующих под нагрузкой твердых тел. Процесс изнашивания в определенной мере обусловлен характером деформирования и перемещений поверхностных слоев материала.

Формирование изнашиваемой поверхности происходит в результате суммирования различных по интенсивности и видам элементарных актов

разрушения и изменений механический и физико-химических свойств материала под воздействием внешних факторов.

Наиболее распространенными видами изнашивания согласно С.В. Венцель являются абразивное, адгезионное, усталостное, кавитационное, коррозионное и эрозионное [6].

Для нормального режима работы подавляющего большинства подвижных сопряжений характерно усталостное изнашивание. Усталостное изнашивание имеет место при повторном деформировании поверхностных слоев твердых тел при внешнем трении. Материал, под действием повторно-переменных напряжений, постепенно накапливает повреждения, приводящие к изменению его строения и свойств, образованию и развитию трещин. Примером усталостного износа являются подшипники.

Подшипниковый узел подвергается наибольшему износу вследствие высоких нагрузок, колебаний, рабочих давлений, температур, изменяющихся скоростей относительного качения, агрессивности окружающей среды, что приводит к возникновению определенного вида изнашивания и как следствие – к снижению работоспособности и уменьшению долговечности подшипникового узла в целом. Накопление повреждений определяется, как правило, не одним каким-либо явлением, а некоторой их совокупностью. Особенно влияет на подшипники качения процессы усталости [7].

Появление первых признаков усталостных повреждений зависит от частоты вращения подшипника, величины нагрузки, эффективности смазывания. Усталостное изнашивание порождает трещины. Перекатывание тел качения по трещинам приводит к откалыванию мелких частиц материала подшипника, в связи с чем возникают участки с шероховатой и крупнозернистой структурой поверхности. Этот процесс называется усталостное выкрашивание (рисунок 3и 4).



Рисунок 3 - Внутреннее кольцо подшипника качения с усталостным выкрашиванием только одного следа вращения по всей периферии



Рисунок 4 - Внутреннее кольцо подшипника качения с усталостным выкрашиванием только одного ряда следов вращения

Усталостное выкрашивание поверхностей качения колец и тел качения может возникать: вследствие недостаточной работоспособности подшипника для действительных условий эксплуатации (из-за действия на подшипник неучтенных нагрузок); при перекосе колец подшипника; на поверхностях качения в зонах механического их повреждения (риски, вмятины), связанного с засорением продуктами износа смазочного материала [7].

При недостаточном смазывании две контактирующие поверхности скользят одна относительно другой под нагрузкой, происходит перенос частиц металла с одной поверхности на другую и происходит задир (рисунок 5). Так же задир может образовываться при незначительных заклиниваниях по каким-либо причинам тел



Рисунок 5 – Внутреннее кольцо конического упорного роликоподшипника с задиром на поверхности буртика внутреннего кольца

Скол представляет собой образование мелких частей, которые отламываются в результате чрезмерной нагрузки или ударной нагрузки, действующей локально на часть угла ролика или буртика кольца с дорожкой качения (рисунок 6).



Рисунок 6 – Внутреннее кольцо сферического упорного роликоподшипника с разломом на большом буртике

Еще одним видом повреждения являются трещины на кольце с дорожкой качения и на элементах качения (рисунок 7).



Рисунок 7 – Наружное кольцо двухрядного цилиндрического роликоподшипника с трещинами, направленными наружу в осевом и периферийном направлениях от очага развития усталостного выкрашивания на поверхности дорожки качения

В тех случаях, когда силы монтажа передаются на кольца через тела качения, на дорожках качения и телах качения могут возникать вмятины. Равным образом вмятины возникают при чрезмерно больших нагрузках на подшипниковые узлы в то время, когда подшипники не вращаются. Причиной вмятин может быть проникновение в подшипник инородных частиц.

Ползучесть представляет собой явление, при котором имеет место относительное скольжение на поверхностях посадки и, в связи с этим, возникает зазор на посадочных поверхностях. Ползучесть приводит к



глянцеватому внешнему виду поверхности, иногда с износом или образованием задиров (рисунок 8).



Рисунок 8 – Ползучесть по всей поверхности наружного кольца подшипника качения

Повреждения сепаратора включают в себя деформации сепаратора, разлом и износ (рисунок 9).



Рисунок 9 – Разрушение перемычек сепаратора конического роликового подшипника

Таким образом, при всем разнообразии повреждений чаще всего имеют место усталостные разрушения, снижающие долговечность подшипников.

## **1.4 Методы повышения срока службы подшипников качения**

### **1.4.1 Общие методы повышения долговечности**

Долговечность машины зависит от совокупности влияния разнообразных факторов, которые проявляются на всех этапах ее создания и эксплуатации.



Чаще всего долговечность машины снижается вследствие износа, поэтому для повышения долговечности следует повышать износостойкость узлов трения и деталей машин. Накопленные мировой практикой методы и способы предотвращения износа можно разделить на следующие группы: материаловедческие; технологические; конструкционные; производственные и эксплуатационные [8].

Материаловедческие методы включают направленный синтез износостойких конструкционных и смазочных материалов, выбор рациональных конструкционных и смазочных материалов в узлах трения, изучение и управление процессами, протекающими в материалах при изнашивании. Материалы деталей и узлов трения помимо износостойкости должны обладать комплексом других свойств, обеспечивающих надежную работу конструкции в целом [8].

Конструкционные методы обеспечивают износостойкость на этапе проектирования машин. Эти методы направлены на следующее:

- смягчение режимов работы материалов в деталях и узлах трения (уменьшение нагрузки, температуры, скорости);
- защиту трущихся деталей от контакта с абразивной и агрессивной средой;
- исключение режимов трения без смазочного материала или в условиях скудной смазки; компенсацию износа деталей; обеспечение равномерного изнашивания деталей;
- исключение катастрофических видов изнашивания деталей при схватывании и задире;
- обеспечение ремонтпригодности деталей и узлов трения.

Это достигается следующим: рациональным подбором сочетания материалов в сопряжении; выбором рациональной геометрии и кинематики узла; заменой опор скольжения на опоры качения; применение различных способов смазки, различных уплотнений, затворов, фильтров, экономичностью

и эффективностью агрегата, обеспечением равнопрочности деталей и узлов; доступностью и простотой обслуживания, ремонта и заменой деталей и узлов.

Технологические методы предупреждения износа основаны на больших технологических возможностях управления износостойкими свойствами деталей на этапе их изготовления и ремонта. Это физико-химическое, тепловой, механическое воздействие на поверхностные слои материалов; плакирование, покрытие, наплавка рабочих поверхностей деталей, наклеп, модифицирование поверхностных структур под воздействием различного рода физических полей и частиц, несущих высокую энергию [8].

Производственные и эксплуатационные методы обеспечения износостойкости реализуются в процессе производства и эксплуатации. На этапе создания техники необходимо точное соблюдение технологии изготовления деталей. В процессе изготовления подвергают контролю следующие параметры: качество поверхностей трения; отклонение формы деталей; твердость поверхностей; точность сборки; биение; регламентированные зазоры и другое.

В условиях реальной эксплуатации для обеспечения износостойкости и увеличения ресурса машин необходимо соблюдение режимов эксплуатации, правил технического обслуживания, своевременное и качественное диагностирование состояния деталей и узлов трения, ремонт и замена изношенных деталей и узлов, ресурс которых исчерпан.

Большое влияние на интенсивность износа ответственных деталей машины оказывает качество ухода за машиной в эксплуатации, особенно своевременная смазка трущихся частей, предохранение их от загрязнения. Правила технического обслуживания должны включать периодичность смазки, технической диагностики и контроля износа узлов трения, периодичность текущих ремонтов и осмотров, карту точек смазывания, периодичность пополнения и замены смазочного материала. при замене смазочного материала необходимо контролировать на соответствие техническим условиям, отсутствие загрязнений, абразивных частиц. Ресурс узлов трения машин и

механизмов в значительной степени определяется работоспособностью применяемых смазочных материалов. Использование смазочных материалов, не предусмотренных технической документацией, может повлечь интенсивное изнашивание узлов трения, потерю смазочной способности [9].

Для подшипников качения наиболее эффективным и реализуемым является метод повышения надежности, который заключается в применении смазочных материалов, которые способствуют повышению износостойкости за счет своих свойств. Если не затрагивать конструкцию подшипникового узла, его долговечность связана с увеличением продолжительности сроков службы пластичных смазочных материалов, и может быть решена путем модифицирования смазочного материала.

Проблема создания и применения смазочных материалов изучается учеными уже очень давно, однако остается актуальной до сих пор. Смазочные материалы обеспечивают нормальную работу и сохранность машин и механизмов. Основными функциями смазочных материалов является:

- уменьшение интенсивности изнашивания трущихся тел;
- снижение трения до необходимого уровня;
- предотвращение заедания узла трения;
- обеспечение отвода теплоты из зоны фрикционного контакта и уноса продуктов износа или коррозии;
- защита поверхностей трения и других элементов конструкции от действия внешней среды (агрессивных жидкостей, газов, паров и абразивных материалов – пыли, грязи и др.) или уплотнение зазоров [8].

Во многих механизмах применение и правильный подбор смазочных материалов позволяют существенно уменьшить трение, что снижает энергозатраты и дает значительную экономию.

Для обеспечения требуемой надежности функционирования узла трения следует стремиться к тому, чтобы смазочный материал наиболее полно отвечал условиям работы трибосистемы.

Смазочный материал должен сохранять свои свойства во всем диапазоне условий эксплуатации, не оказывая при этом воздействия на контактирующие материалы.

Применяемые смазочные материалы по агрегатному состоянию делят на следующие виды: жидкие (масла); пластичные (пластичные смазки); твердые; газообразные.

В подшипниках качения применяются и жидкие, и пластичные, и твердые смазочные материалы. Наиболее часто применяются пластичные смазочные материалы (далее ПСМ).

По реологическим свойствам пластичные смазки занимают промежуточное положение между маслами и твердыми смазочными материалами, они сочетают в себе свойства твердого тела и жидкости, что связано с их строением. ПСМ являются высокоструктурированными тиксотропными дисперсиями.

В общем случае пластичные смазки можно рассматривать как двухкомпонентные коллоидные системы, которые состоят из трехмерного структурного каркаса, образованного твердыми частицами загустителя (дисперсная фаза) и включенного в ячейки этого каркаса масла (дисперсионная среда – жидкая основа), которое удерживается капиллярными, адсорбционными и другими физическими связями. Реологические свойства пластичных смазок определяются, прежде всего, особенностями трехмерного структурного каркаса [10].

В пластичных смазках содержание загустителя может составлять 5-25 %. В качестве твердого загустителя могут выступать соли высокомолекулярных карбоновых кислот, твердые углеводороды (парафин, церезин и т.п.), высокодисперсные неорганические (силикагель, бентониты, графит и т.п.) и органические (сажа, пигменты, полимеры, производные мочевины и т.п.) материалы с хорошо развитой удельной поверхностью, способные к структурообразованию в неводных средах [8, 12].

Смазка, не соответствующая требованиям узла по реологическим характеристикам и не обеспечивающая поддержание этого слоя, даже при наличии высокоэффективных присадок, оказывается малоэффективной. Но и при выполнении этих условий одни и те же смазки могут сильно различаться по длительности безотказной работы и уровню несущей способности в зависимости от конструкции трущихся деталей подшипника.

Пластичные смазки относятся к средам, у которых упругие деформации пренебрежимо малы. Однако именно упругие деформации оказывают существенное влияние на характер деформационного поведения тиксотропных пластичных дисперсных сред, что обуславливает особенность их сдвигового течения в рабочих каналах измерительных приборов и технологического оборудования [10].

Применение пластичных смазок позволяет упростить конструкцию смазываемого сопряжения, снизить расходы на обслуживание, однако пластичная смазка существенно хуже отводит теплоту от места фрикционного контакта и практически не выносит продуктов износа.

Все компоненты пластичной смазки должны характеризоваться высокой трибостабильностью и хорошими противоизносными свойствами. Реологические характеристики должны обеспечивать поступление оптимального количества пластичной смазки в зону трения [10].

Для улучшения эксплуатационных свойств смазочного материала применяют специальные добавки, называемые присадками. Необходимо, чтобы металл пары трения вступал в реакцию с активной частью присадки, а сама присадка равномерно распределялась по смазочному материалу и не оседала на поверхностях трения. По назначению присадки бывают разные, например, антифрикционные, противоизносные, противозадирные, вязкостные, депрессорные, антикоррозионные, моющие, многофункциональные [12]. Смазочный материал, содержащий присадки, называют модифицированным.

#### **1.4.2 Модифицированный смазочный материал**

В ходе выполнения работы был проведен патентно-информационный поиск, результат которого приведен ниже.

Последовательность развития направления снижения трения и износа трущихся элементов машин и механизмов за счет специальных триботехнических добавок выглядит следующим образом:

- металлоплакирующие добавки (мелкодисперсные порошки мягких металлов и их солей);
- порошковые наполнители слоистых силикатов (порошки минералов семейства серпентинитов);
- композиции из оксидов (окислов).

Последние десятилетия большую популярность в качестве добавок к смазочным материалам приобрели препараты, содержащие так называемые природные геомодификаторы трения (далее ГМТ), которые представляют собой порошкообразные слоистые гидросиликаты (серпентин, серпентинит, хлорит и т.п.). Применение этих препаратов обеспечивает повышение противоизносных и антифрикционных свойств смазочных материалов и в ряде случаев – восстановительный эффект – залечивание изношенных участков трущихся поверхностей и тем самым увеличение ресурса работы смазываемых узлов трения.

При использовании смазочной композиции с ГМТ значительно снижаются потери энергии на трение в подвижных соединениях (за счет образования на поверхностях трения защитных металлокерамических пленок); в 1,5...2,5 раза повышается усилие схватывания, т.е. задиростойкость узлов трения и долговечность деталей. Авторами [13], установлено, что ГМТ, добавленный в смазочный материал в определенном соотношении, например в соотношении 1:10, обеспечивает суперфинишную обработку поверхностей трения, доводя параметр шероховатости этих поверхностей до 0,04...0,16 мкм. Уменьшение шероховатости улучшает микрогеометрию трибосопряжений (обеспечивает лучшую прилегаемость деталей), снижает расход смазочного

материала. В опорах качения и скольжения снижается износ и увеличивается несущая способность трибосопряжений [13].

В последние годы появился ряд технических решений (патент РФ №2043393, патент РФ №2127299, патент РФ №2131451), согласно которым в качестве наполнителя твердосмазочных композиций используются слоистые природные гидросиликаты: серпентинит, тальк, серпентин, нефрит и другие.

Серпентинит – метаморфическая горная порода, состоящая из серпентина  $[(Mg_{6-x}Al_x)(Si_{4-x}Al_x)O_{10}(OH)_8]$ , хризотила, антигорита, магнитного и хромистого железняков и остатков оливина и пироксенов [14].

Серпентины  $Mg_3[(Si_2O_5)(O)_4]$  – это триоктаэдральные (1:1) филлосиликаты. Слоистые чешуйки могут легко скользить друг по другу и по поверхности металла. Поэтому частицы серпентина могут деформироваться и растягиваться на впадинах металлической поверхности, что приводит к образованию на трущихся металлических поверхностях так называемой самовосстанавливающейся пленки – сервовитной пленки, существенно уменьшающей их износ. Прочностные и антифрикционные характеристики сервовитной пленки зависят, в частности, от условия изготовления, состава композиции, приработки после введения ее между поверхностями трения, от состояния последних и т.п. Гидроксильный силикат магния имеет много активных групп, которые могут реагировать с вновь образуемой в трибологическом процессе металлической поверхностью.

Коэффициент трения сталей в среде минерального масла составляет 0,127, в то время как коэффициент трения в масле, содержащем наночастицы серпентина, после короткой приработки снижается до 0,05, т.е. снижение коэффициента трения составляет по сравнению с чистым маслом приблизительно 60,6 %. Это показывает, что дисперсность и стабильность присадки хорошие, но из-за повышения температуры масла коэффициент трения начинает постепенно расти. Как известно, поверхностная температура пар трения при смазывании чистым маслом может быть достаточно высока и увеличивается с увеличением времени испытания. Однако при смазывании

маслом, содержащим серпентин, температура поверхности снижается на 35 % [14].

**1) Патент РФ №2277577 – Триботехническая добавка к смазочным маслам и пластичным смазкам.**

Триботехническая добавка к смазочным маслам и пластичным смазкам, включающая двуокись кремния и минеральное сырье, дополнительно содержит полиэдральные многослойные углеродные наноструктуры фуллероидного типа, смесь фуллеренов общей формулы  $C_{60}$  и  $C_{70}$  и аморфный углерод, а в качестве минерального сырья – мусковит  $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$ , альбит  $NaAlSi_3O_8$  и микроклин  $KAlSi_3O_8$  при следующем соотношении компонентов, мас.% [15]:

Таблица 3 – Компоненты триботехнической добавки патент №2277577

Двуокись кремния	40-45
Мусковит	2-3
Альбит	3,5-4,0
Микроклин	2-3
Полиэдральные многослойные углеродные наноструктуры фуллероидного типа	0,001-1
Смесь фуллеренов $C_{60}$ и $C_{70}$	0,2-5,0
Аморфный углерод	Остальное

Триботехническая добавка имеет вид мелкодисперсного порошка с размером частиц 0, 001-0,1 мкм.

В качестве аморфного углерода композиция содержит сажу. Фуллерены общей формулы  $C_{60}$  и  $C_{70}$  можно вводить отдельно, но можно использовать фуллеренсодержащую сажу, полученную, например, методом дугового разряда в атмосфере инертного газа [15].

При использовании заявляемой добавки исходный коэффициент трения не растёт, даже несколько снижается.

**2) Патент РФ №2319731 – Триботехническая добавка к смазочным маслам и пластичным смазкам.**



Триботехническая добавка к смазочным маслам и пластичным смазкам для формирования антифрикционного покрытия с компенсацией износа поверхностей узлов трения содержит, мас.% [16]:

Таблица 4 - Компоненты триботехнической добавки патент №2319731

аморфный диоксид кремния	40...60
аморфный оксид алюминия	5...15
аморфный углерод	6...10
аморфный оксид магния	5...15
кремнийорганическое соединение алюминия и цинка	5...15
органический растворитель	остальное

При этом компоненты преимущественно представлены: аморфный диоксид кремния в виде  $\text{SiO}_2$ ; аморфный оксид алюминия в виде  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; аморфный углерод в виде сажи; оксид магния в виде  $\text{MgO}$ , кремнийорганическое соединение алюминия и цинка в виде цинкалюмосилоксана в жидкой фазе, органический растворитель в виде толуола. Без растворителя добавка представляет собой гомогенизированную смесь порошков компонентов с размерами частиц не более 1 мкм [16].

Основная идея состава триботехнической добавки именно в компенсации (восстановлении) износа поверхностей трения. Но при этом антифрикционные свойства также имеют важное значение. Приведенные испытания показали, что заявленный состав добавки для формирования антифрикционного покрытия с компенсацией износа поверхностей узлов трения обеспечивает значительное снижение трения по сравнению с базовой смазкой.

### **3) Патент РФ №2443765 – Смазка для узлов трения подшипников качения и скольжения.**

В состав смазки на основе загущенных мылами масел, содержащим многофункциональную присадку и графитокolloидный препарат, дополнительно введены дисульфид вольфрама и полиизобутилен П-20, а в качестве многофункциональной присадки 1,4-ди(N-арилсульфониламино)-2(тиобезтиазол)бензол при следующем соотношении компонентов, мас.% [17]:

Таблица 5 – Компоненты смазки патент №2443765

Графитокolloидный препарат	4-8
Дисульфид вольфрама	3-9
Полиизобутилен П-20	2-4
Многофункциональная присадка	0,5-2
Загущенные мылами масла	до 100

Графитокolloидный препарат обеспечивает стабильное антифрикционное свойство смазки в интервале температур до 250°C. Графитокolloидный препарат обеспечивает противозадирные и антикоррозионные свойства смазки и повышает ее рабочую температуру до 250°C.

Дисульфид вольфрама - эффективная антифрикционная присадка, применение которой улучшает условия работы тяжело нагруженного узла трения в условиях высокой температуры, многократно повышает ресурс работы смазки и оборудования. При содержании дисульфида вольфрама ниже 3 мас.ч. антифрикционные свойства смазки резко уменьшаются, а при содержании выше 9 мас.ч. они остаются практически неизменными.

В качестве вязкостной присадки используют полиизобутилен П-20. Эта присадка добавляется в зависимости от используемой основы [17].

Многофункциональная присадка представляет собой органическое соединение. Многофункциональная присадка повышает:

- антикоррозионные свойства смазки при повышенных температурах;
- противозадирные и противоизносные свойства смазки, особенно в тяжело нагруженных узлах трения, подшипников качения и скольжения.

Обработка статистических данных после проведенных испытаний, противоизносных свойств консистентных смазок на основе Li-, Na-, Ca-мылов и предложенной смазки различных составов позволяет утверждать, что ее противоизносные свойства выше, чем у смазок типа Литол-24, что увеличивает срок службы трущихся пар и что подтверждается примерами реализации смазок [17].

#### **4) Патент РФ №2457239 – Пластичная смазка для подшипников качения.**

Пластичная смазка для подшипников качения содержит пластичную основу - смазку Литол-24 и присадку в виде порошка наноалмаза детонационного синтеза, очищенного до содержания несгораемых примесей менее 0,1% от массы наноалмаза, с размером частиц не более 5 нм при следующем соотношении компонентов, мас.% [18]:

Таблица 6 – Состав пластичной смазки патент №2457239

наноалмаз детонационного синтеза	0,01-0,05
смазка литол-24	остальное до 100.

Пластичную смазку для подшипников качения готовят простым перемешиванием двух коммерчески готовых компонентов: смазки Литол-24 и порошка наноалмаза до гомогенного состояния.

Известно, что наноалмазы, благодаря своим разнообразным и необычным свойствам, которые обусловлены нанометровым масштабом их структурных элементов, нашли широкое применение в создании новых материалов и технологий для практического использования в биологии, медицине и промышленности.

Основой предлагаемого изобретения является получение композиционного материала - пластичной смазки для подшипников качения с использованием порошка наноалмаза детонационного синтеза, свойства частиц которого позволяют при минимальной их концентрации в смазке (менее 0,05 мас.%) достичь увеличения срока службы смазки в несколько раз. Эти свойства частиц наноалмаза получены за счет глубокой химической очистки алмазо-графитовой шихты детонационного синтеза до получения основной фракции порошка наноалмаза с размером частиц 3-5 нм с выходом до 60%.

Также установлено, что полученные порошки наноалмаза сохраняют в течение длительного периода (более 15 лет) неизменными свои физико-химические свойства, в то время как порошки наноалмаза, очищенные по

другим технологиям, начинают графитизироваться намного раньше и теряют свои ценные свойства [18].

Порошок наноалмаза, полученный из алмазо-углеродной шихты методом детонационного синтеза и глубокой химической очистки (пат. РФ 2081821) является готовым продуктом, не требующим технологической обработки. Он имеет наименьшее количество несгораемых примесей (менее 0,1%), которые являются практически загрязнителями смазки. Частицы наноалмаза размером 3-5 нм равномерно распределяются в объеме пластичной смазки Литол-24 и при введении в подшипники качения проникают во все микродефекты поверхности (поры, микротрещины, царапины). В результате создается ровная антифрикционная поверхность качения подшипников. При этом для достижения такого эффекта достаточно небольшого количества порошка наноалмаза (0,01-0,05% от массы смазки), что объясняется наибольшей каталитической активностью поверхности наночастиц указанных размеров. Добавление наноалмаза размером частиц 3-5 нм в базовую смазку Литол-24 в концентрациях около 0,01-0,05 мас.% более чем в 3 раза уменьшает шероховатость и количество дефектов дорожек качения, вследствие чего срок службы подшипников качения возрастает более чем в два раза, по сравнению с использованием только Литол-24.

Для экспериментальной проверки заявленной смазки были приготовлены четыре состава смазок, приведенных в таблице 7. Проводились замеры средних значений шероховатости ( $Ra$ , мкм), количества дефектов ( $V$ , шт.), дорожек качения подшипников и номинальный срок службы ( $L$ , час).

Результаты исследования показали, что при уменьшении концентрации с 0,1% до 0,01% шероховатость уменьшается в среднем на 30%, а количество дефектов - 40% [18].

Таблица 7 – Результаты исследований патент №2457239

№ опыта	Вид смазки	$Ra$ , мкм	$V$ , шт.	$\geq L$ , ч
---------	------------	------------	-----------	--------------

1	Литол 24	0,0917	9	1000
2	Литол 24+0,5% мас. наноалмазов	0,0583	15	1360
3	Литол 24+0,1% мас. наноалмазов	0,0487	11	1500
4	Литол 24+0,05% мас. наноалмазов	0,0387	4	1900
5	Литол 24+0,01% мас. наноалмазов	0,0293	3	2200

Таким образом, простое добавление порошка наноалмазов в базовую смазку Литол-24 в оптимальных концентрациях 0,01-0,05 мас.% значительно упрощает технологию изготовления и многократно улучшает свойства смазки, а добавление свыше 0,1 мас.% порошка существенно ухудшает качество поверхности качения подшипников и удорожает полученную смазку.

#### **5) Патент РФ № 2529461 – Пластичная смазка для тяжело нагруженных узлов трения качения.**

Заявленная пластичная смазка для тяжело нагруженных узлов трения качения на основе смеси синтетического углеводородного масла и сложного эфира пентаэритритового спирта и синтетических жирных кислот фракции C5-C9, характеризующаяся тем, что содержит комплексное кальциевое мыло стеариновой и уксусной кислот, графит мелкодисперсный, фенил-альфа-нафтиламин, ионол, с примененным в качестве синтетического углеводородного масла полиальфаолефиновое масло с большей вязкостью, при следующем соотношении компонентов в массовых долях [19]:

Таблица 8 – Состав пластичной смазки патент №2529461

кислота стеариновая	7,0-16,0%
кислота уксусная	2,0-4,0%
гидрат окиси кальция	5,0-10,0%
графит мелкодисперсный	7,0-15,0%
фенилальфа-нафтиламин	0,1-0,5%
полиальфаолефиновое масло с вязкостью 23-28 сСт (при 100°C)	12,0-19,9%
сложный эфир пентаэритритового спирта и синтетических жирных кислот фракции C5-C9	остальное

Предлагаемую смазку, в частности, готовят путем омыления кислот раствором гидроокиси кальция, выпарки воды и термообработки при нагревании до температуры 220-250°C с последующей гомогенизацией

полученного состава. Антиокислительные присадки вводятся на стадии охлаждения смазки. Графит вводится в готовую основу с последующей механической обработкой смазки.

Перспективным направлением в области смазочных материалов является использование тонкодисперсных порошковых композиций, вводящихся в состав как жидких, так и густых смазок.

Одним из наиболее распространенных сухих смазочных веществ является графит. Основное достоинство графита в том, что он образует прочные пленки на трущихся поверхностях.

Технический углерод так же является перспективной антифрикционной добавкой к пластичной смазке.

Для сравнения были изучены особенности смазок на базе графита и дисульфида молибдена. Эти материалы обеспечивают весьма низкий коэффициент трения – менее 0,1. Важное значение имеет тщательное измельчение твердых добавок. Обычно добиваются получения порошкообразных твердых добавок с частицами размером менее 10 мкм, а нередко и менее 1 мкм [19].

Так как стоимость графита значительно превышает стоимость сажи, то создание пластичной смазки с добавлением сажи или графитизированной сажи будет актуальным. В настоящее время выпускается целый ряд, различных по свойствам, марок технического углерода. Одним из путей повышения эффективности приготовления пластичных смазок является подбор технического углерода, который обладал бы антифрикционными характеристиками не хуже, чем графит.

Для каждой поставленной конкретной задачи (повышение антифрикционных, противозадирных и противоизносных свойств масла, повышение коллоидной стабильности, улучшение приработочных свойств, улучшение трибологических характеристик пар трения, увеличение адгезионной прочности покрытия на металлах, обеспечение высоких эксплуатационных характеристик смазочных материалов, обеспечение

долговечности и эффективности работы смазки, стабильности работы двигателя, восстановление изношенных поверхностей трения, повышение равномерности, стабильности и долговечности антифрикционного покрытия) требуется конкретная добавка, с помощью одной какой-либо добавки невозможно улучшить сразу все параметры и эксплуатационные характеристики [12].

**6) Патент РФ №2584115 – Добавка к смазочным маслам и пластичным смазкам.**

Задачей настоящего изобретения является создание добавки такого компонентного состава, использование которой в смазочном материале обеспечивает снижение расхода топлива в двигателях внутреннего сгорания. предлагаемая добавка представляет собой мелкодисперсный порошок, содержащий смесь диоксида кремния с углеродом синтетическим. Содержание диоксида кремния со средним размером частиц 10 нм в смеси составляет 99,0-99,9% мас., содержание углерода синтетического со средним размером частиц 30 нм - 0,1-1,0% мас. [20]:

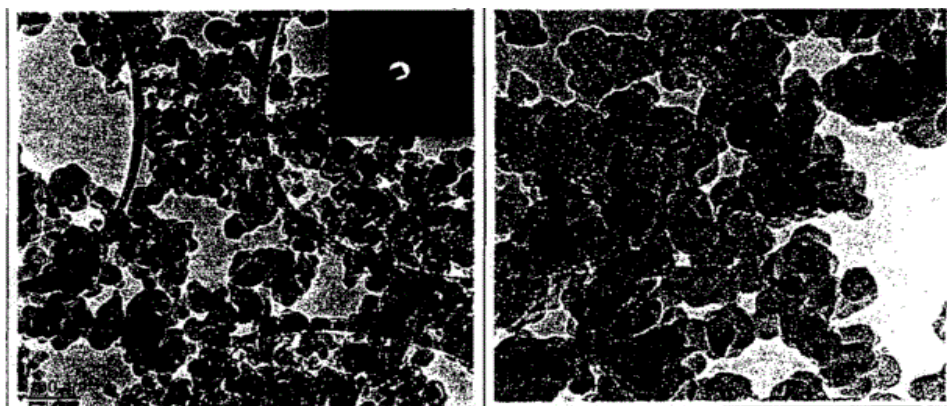


Рисунок 10 - Общий вид порошка и соответствующая данной области дифракционная картина, участок агломерата порошка

Особенностью углерода синтетического является то, что он представляет собой агломераты, состоящие из наночастиц «луковицеобразной» структуры (рисунок 11).



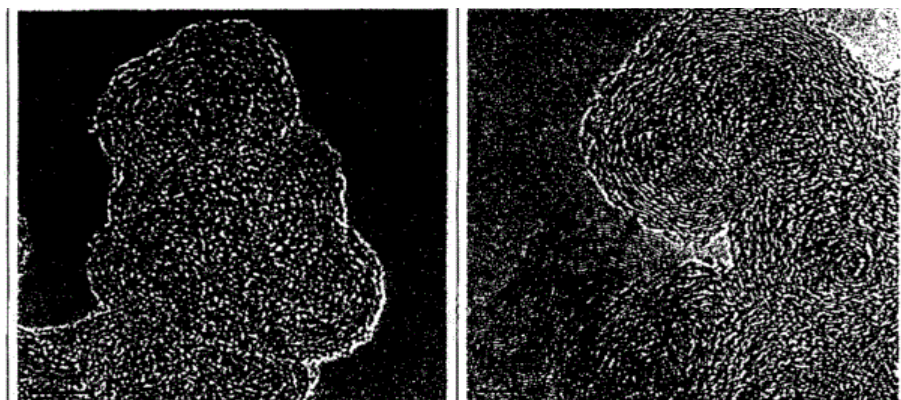


Рисунок 11 - Луковицеобразная структура наночастиц

Добавка вводится в количестве 0,005-0,01% мас. в смазочное масло, в количестве 0,01-0,02% мас. в пластичные смазки.

Мелкодисперсный порошок диоксида кремния получают кислотным гидролизом тетраалкоголятов кремния с последующим высушиванием.

Углерод синтетический получают методом низкотемпературной плазмы при воздействии хлора на углеводороды (метан). В результате реакции получен мелкодисперсный порошок углерода.

Заявляемая добавка приготавливается путем перемешивания компонентов при заданном массовом соотношении [20].

Добавка химически нейтральна к смазочному материалу, что обеспечивает безопасность применения в любых узлах и механизмах.

Твердые смазочные материалы и ряд минеральных наполнителей так же применяют в качестве добавок к пластичным смазочным материалам. Как известно, наличие непрерывной смазочной пленки, разделяющей трущиеся тела, необходимо для обеспечения безызносного режима работы узла трения. Однако образование непрерывного смазочного слоя затрудняется при увеличении нагрузки и при высоких температурах, когда в результате снижения вязкости уменьшается толщина пленки, а при дальнейшем увеличении температуры происходит десорбция смазочного материала, приводящая к заеданию и катастрофическому износу [21]



Присадки к смазочным маслам позволяют создавать тончайшие наноразмерные поверхностные адсорбированные пленки полярных молекул газов и жидкостей или твердые пленки, прочно соединенные с поверхностью в результате химической реакции. Преимущества последних в том, что при механическом повреждении они восстанавливаются в процессе работы узла трения при достаточном времени взаимодействия смазочного материала с поврежденным участком, предотвращают схватывание контактирующих поверхностей и снижают потери на трение.

В качестве твердых смазочных материалов (далее ТСМ) применяют халькогениды тугоплавких металлов, фториды кальция и церия, йодид серебра, графит, высокодисперсный углерод, мягкие металлы, серпентины, высокомолекулярные полимеры (нейлон, ПТФЭ и др.). Наиболее распространенными ТСМ являются дисульфид молибдена, графит, высокодисперсный углерод и политетрафторэтилен (ПТФЭ). ПТФЭ обладает уникальными антифрикционными свойствами – из всех ТСМ он обеспечивает наиболее низкий коэффициент трения как в статических, так и в динамических условиях, что позволяет использовать его в качестве антискачковой присадки к смазочным материалам [14].

Требования к эксплуатационным свойствам смазочных материалов, применяемых в подшипниках качения, а также появление современных нанофазных материалов с универсальными свойствами сформировали новое направление в области создания смазочных материалов. Введение в пластичные смазочные материалы подобных добавок повышает их противоизносные и антифрикционных свойств, улучшает реологические свойства, увеличивает прочность смазочного слоя.

В последнее время широко применяют в качестве добавок к смазочным материалам соединения, содержащие такие металлы, как Pb, Sn, Cu, Mo, Cd, Ni и др., улучшающие противоизносные и противозадирные показатели узлов трения машин. Эффективность этих металлов возрастает от введения их в смазку на ионном уровне (металлоплакирующие присадки) [22].

Известны металлоплакирующие смазочные материалы [12] принцип действия которых состоит в формировании на участках фактического контакта защитных пленок на основе мягких металлов Cu, Sn, Pb, Zn, Mo и других, которые уменьшают силовое воздействие и интенсивность изнашивания сопряженных поверхностей. По фазовому признаку металлоплакирующие смазочные материалы подразделяются на гомогенные и гетерогенные. Первые в качестве присадок содержат растворимые в базовой смазочной среде соединения металлов, вторые содержат металл или его окислы в виде порошков. Однако эти материалы обладают рядом недостатков (зависимость эффективности формирования пленки от концентрации металлов в среде, низкая устойчивость дисперсий металлических порошков, высокая степень чистоты порошков и другие), из-за которых их применение ограничивается главным образом пластичными смазками для определенных узлов трения.

Как известно, эффективность действия присадок на работоспособность стальной пары трения может заметно изменяться в зависимости от концентрации и состава присадки, а также химического состава базового масла.

Одним из способов улучшения полезных свойств пластичных смазочных материалов является введение в их состав соединений меди. В научной литературе ряд работ посвящено изучению влияния добавок:

$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , CuS, CuO,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ , ультрадисперсного порошка меди, полученного плазменноконденсационным методом, – на антифрикционные свойства пластичных смазочных материалов [22].

Практически любые медьсодержащие добавки улучшают антифрикционные свойства основы за счет образования на поверхности трения тонкой медной пленки. Л.И. Погодаевым [23] выполнены комплексные исследования влияния добавок к пластичной смазке "Литол 24" тонкодисперсных порошков цинка, кадмия и бронзы на износостойкость и триботехнические свойства пар трения. Выявлено, что наибольшее влияние на усилие схватывания оказывает цинк, содержащийся в смазочной композиции в количестве 10 масс. %. При таком же содержании кадмия наблюдается

наибольшее критическое давление (критическое усилие разрушения смазочной пленки). Действие смазочного материала, наполненного медью, по-видимому, основано на вдавливании ее частиц в неровности поверхности трения и размазывании их по ней (плакирование), в результате чего увеличивается фактическая площадь контакта, снижаются коэффициент трения и износ трущихся деталей. В случае использования соединений меди пленка получается более эффективной вследствие того, что взаимодействие меди с поверхностью трения происходит в момент "трибовосстановления". При этом, наиболее эффективной добавкой является оксид меди [23, 22].

Эффективность соединений, содержащих серу, фосфор, хлор, азот и т.д., связана с формированием на поверхностях трения защитных пленок вторичных структур, которые обеспечивают положительный градиент механических свойств по глубине. При этом интенсивное адгезионное изнашивание сменяется более умеренным – коррозионно-механическим, но изнашивание все-таки имеет место.

Учитывая, что содержание алюминия в природе в количественном отношении значительно превосходит наличие таких элементов, как медь и олово, а также что стоимость алюминия в несколько раз ниже, чем вышеуказанных металлов, Авторами [24] была разработана маслорастворимая алюминий содержащая смазочная композиция и проведено исследование ее триботехнической эффективности. Результаты исследований приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Значения шероховатости при различных смазочных материалах.

Смазочный материал	Шероховатость $R_a$
До работы	0,14
Масло промышленное И-50А	0,22
Масло промышленное И-50А + медьсодержащая присадка	0,22
Масло промышленное И-50А + алюминийсодержащая композиция	0,16

Наличие алюминий содержащей композиции ведет к повышению контактной выносливости тел качения в 1,3 раза по сравнению с базовым

смазочным материалом (рисунок 12). Наличие на контактирующих поверхностях мягкой пленки, в состав которой входит алюминий особой структуры и свойств, лежащий на упроченной подложке, обеспечивает локализацию процесса трения в тончайшем поверхностном слое и препятствует вовлечению в процесс деформации более глубоких слоев металла. При этом низкий коэффициент трения и высокая износостойкость подвижных сопряжений как при скольжении, так и качении, связаны в основном с наличием в смазочном материале алюминий содержащей композиции, которая обеспечивает формирование антифрикционной и противоизносной пленки, а также расширяет диапазон удельных нагрузок, при которых узел трения работает в нормальном режиме [24]

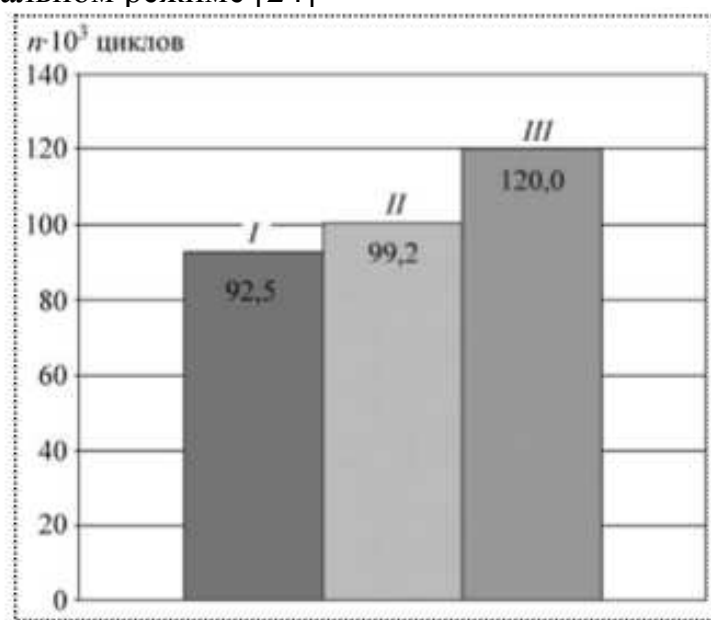


Рисунок 12 – Влияние смазочных материалов на контактную выносливость тел качения: I - масло индустриальное И-40; II - масло индустриальное И-40 + 0,1% медьсодержащая присадка; III - масло индустриальное И-40 + 2,5% алюминийсодержащая композиция

Известно, что некоторые минералы слоистого строения (типа слюды, каолина, графита и т.д.) широко используют в качестве загущающих и противоизносных присадок. Их положительный эффект обусловлен способностью этих минералов образовывать на поверхностях трения тонкие пленки, состоящие из чешуйчатых частиц, ориентированных параллельно

поверхности трения. Эти пленки (или слои) разделяют трущиеся поверхности, сглаживают их микрорельеф, а в случае сухого трения переводят его в трение внутреннее, при котором сдвиг происходит внутри слоя частиц [21]. Таким образом, осуществляется чисто механическая защита трущихся поверхностей от износа.

В этой связи большой практический интерес представляет собой задача подобрать такой смазочный материал, который наряду с указанными положительными свойствами обладал бы способностью химически и механохимически взаимодействовать с материалом деталей трибосопряжений, создавая на их поверхностях пленки с улучшенными трибологическими свойствами.

При изучении механохимических реакций с участием минеральных частиц, поверхностно-активных веществ, наноразмерных частиц и первичной сажи была обнаружена важная роль их композиций в механоактивации металлических поверхностей при трении, способных при их разрушении вступать во взаимодействие с вновь образованными активными фрагментами среды и металлом трущихся тел [25].

На основании многих проведенных исследований видно, что фуллерены и фуллереновые сажи могут успешно применяться в качестве антифрикционных, противоизносных и антизадирных добавок. Известно, что минералы этой группы силикатов минерализуются в виде тонких пластинок и проявляют совершенную спайность параллельно структурным слоям [21].

Фуллерены и фуллереновые сажи относятся к ультрадисперсным добавкам, изучение которых в настоящее время актуально.

### **1.5 Смазочные материалы с ультрадисперсными добавками**

Эффективными модификаторами смазочных материалов являются наноразмерные добавки различной природы, которые обладают структурирующими свойствами и могут обеспечить формирование бинарной

дисперсной фазы, состоящей из наночастиц добавки и коротковолокнистых волокон загустителя и характеризующейся большей разветвленностью и повышенной маслоудерживающей способностью [10, 26, 27]

Формирование в поверхностных слоях нанокристаллических структур, вследствие присущих им чрезвычайно высоких пластических свойств, может приводить к эффективному поглощению энергии фрикционного взаимодействия при трении и обеспечивать высокое сопротивление зарождению и распространению микротрещин. В связи с этим формирование наноразмерных структур в поверхностных слоях элементов пар трения в процессе трибоконтакта является перспективным методом повышения износостойкости материалов пар трения. Имеющиеся в литературе данные свидетельствуют о том, что добавка в смазочные материалы высокодисперсных углеродосодержащих продуктов детонационного синтеза (наноалмазов, алмазографитовой шихты) зачастую интенсифицирует образование субмикрокристаллических структур в поверхностях трения, что весьма эффективно повышает эксплуатационный ресурс трибосопряжений. Вместе с тем, положительный эффект от добавок алмазосодержащих наноприсадок в смазки сильно зависит от исходного структурного состояния материалов пар трения [28].

Как было сказано в п. 1.4.1 в пластичных смазочных материалах дисперсионная среда (75...95 мас. %) представляет собой масло, а дисперсная фаза (5...25 мас. %) – твердый загуститель, в качестве которого могут выступать соли высокомолекулярных карбоновых кислот, твердые углеводороды, высокодисперсные неорганические и органические материалы с хорошо развитой удельной поверхностью, способные к структурообразованию в неводных средах.

В исследуемых в работе подшипниках качения применяется простая литиевая пластичная смазка Литол-24 (ГОСТ 21150-87). Дисперсионной средой является смесь масел веретенного АУ и индустриального И-50А (1:3), дисперсная фаза образована литиевой солью 12-гидрооксистеариновой кислоты

и составляет 10 мас. % [29]. Структура дисперсной фазы смазки Литол-24 в исходном состоянии представлена на рисунке 13.

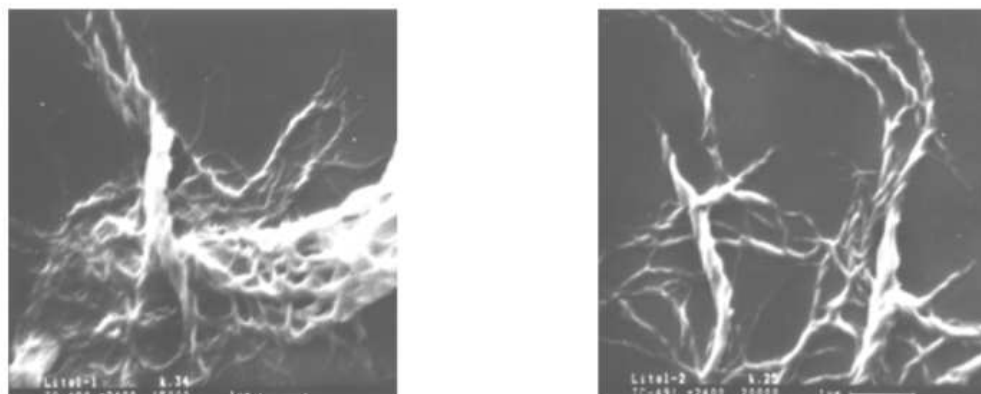


Рисунок 13 Микроструктура дисперсной фазы смазки Литол-24 в исходном состоянии при различном увеличении

Как видно, дисперсная фаза имеет ярко выраженную волокнистую структуру. Волокна толщиной до 0,05 мкм сплетены в жгуты диаметром от 0,1 до 0,5 мкм, длина волокон превышает 10 мкм.

Исследование структуры дисперсной фазы смазки Литол-24 после триботехнических испытаний (путь трения – 15 км) показало, что в процессе трибоконтактирования структура дисперсной фазы претерпевает существенные изменения. При этом под деформационно-термическим воздействием происходит дробление ее волокон и их компактирование. При этом волокна выпрямились и увеличились по толщине в 5 раз, кроме того, значительно укоротилась их длина. Образовавшиеся при трении конгломераты дисперсной фазы имеют уплотненную структуру с остатками волокнистого строения [28, 26]. Так же можно наблюдать уплотненные образования из полностью разрушившихся волокон, которые распались на глобулы, заполненные дисперсионной средой (рисунок 14).

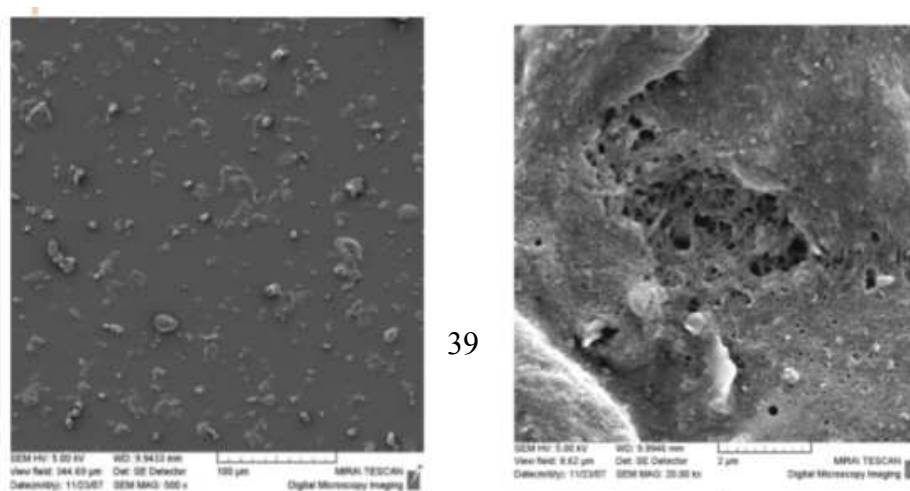


Рисунок 14 - Микроструктура смазки Литол-24 после 15 км пути трения при различном увеличении

Таким образом, в процессе работы пары трения пластичный смазочный материал испытывает в зоне трибоконтакта интенсивное деструктирующее воздействие, в результате которого происходит быстрое разрушение длинноволокнистой структуры дисперсной фазы простых литиевых смазок.

Структура дисперсной фазы смазки с алмазосодержащим пакетом добавок в исходном состоянии представлена на рисунке 15. Как видно, структура дисперсной фазы представлена сложным комплексом прямых ровных волокон и включений добавок, оплетенных более мелкими волокнами.

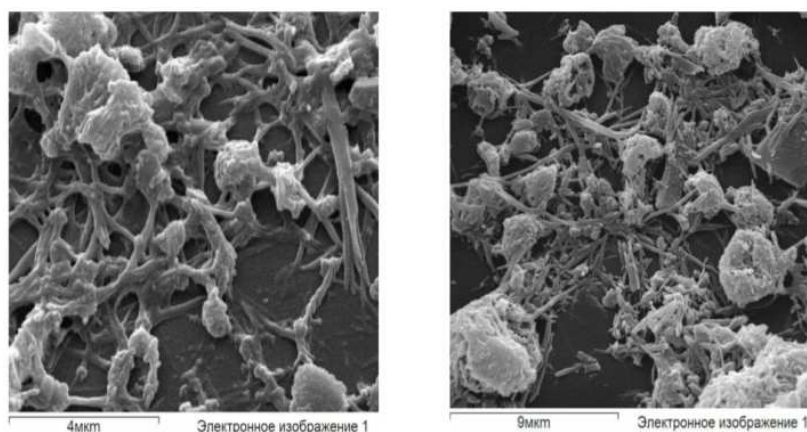


Рисунок 15 - Микроструктура дисперсной фазы смазки с алмазосодержащим пакетом присадок в исходном состоянии при различном увеличении

Из представленных иллюстраций видно, что добавки оплетены волокнами комплексной соли. Данный эффект обусловлен специальным технологическим приемом модифицирования пластичных смазочных материалов наноразмерными добавками, предполагающим введение последних



в состав смазочной композиции до начала процесса образования структуры дисперсной фазы.

Таким образом, частицы антифрикционных добавок содержатся в загустителе смазочного материала, образуя при этом бинарную дисперсную фазу, отличную от простых мыльных загустителей типа оксистеарата лития (Литол-24). Данный эффект усиливается с уменьшением размеров частиц.

В случае взаимодействия пары трения в присутствии комплексной литиевой смазки, модифицированной наноразмерными добавками, во-первых, разветвленная коротковолокнистая структура дисперсной фазы обеспечивает большую маслоудерживающую способность и, следовательно, большую нагрузочную способность смазочного материала, во-вторых, наноразмерные частицы повышают коллоидную стабильность смазочного материала, в-третьих, при разрушении структурного каркаса твердые частицы, входящие в состав волокон дисперсной фазы, высвобождаются и попадают в зону трения в активном состоянии, сохранив сверхмалые размеры, и продолжают работать как противозадирная добавка. приводит к повышению стабильности и нагрузочной способности смазочного слоя.

Исследование структуры дисперсной фазы смазки с алмазосодержащим пакетом добавок после триботехнических испытаний на пути трения 15 км появились признаки изменения структурного каркаса смазки (рисунок 16), однако деградация структуры дисперсной фазы прошла не так глубоко, как в случае тонковолокнистой структуры простой литиевой смазки. [28, 26].



Рисунок 16 - Микроструктура дисперсной фазы смазки с алмазосодержащим пакетом добавок после 15 км пути трения при различном увеличении

Использование пластичной смазки с пакетом наноразмерных добавок приводит к интенсификации приработки и ускоренному выходу процесса фрикционного взаимодействия на стадию установившегося трения; использование пакета добавок снижает интенсивность изнашивания на стадии установившегося трения, что связано с модифицированием поверхностных слоев элементов пары трения алмазнографитовыми частицами и образованием наноразмерных ячеистых структур.

Использование смазочного материала, модифицированного ультрадисперсными твердыми частицами различной природы в диапазоне нагрузок 25...50 МПа, снижает интенсивность изнашивания материала, причем эффективность действия этих добавок увеличивается по мере повышения удельной нагрузки в зоне трибоконтакта [30, 31, 25].

Для наноразмерных частиц алмазографита характерна высокая адгезионная способность к металлическим поверхностям. На контактирующих поверхностях образуется ориентированный слой – прочная пленка, что способствует прочному удержанию граничного слоя смазочного материала на поверхности трения, снижению коэффициента трения и восприятию высоких нагрузок без разрушений [25].

Другим примером ультрадисперсной добавки является медь. В 2010 №2 предлагается использовать ультрадисперсные медьсодержащие порошки (УМП) с размерами частиц менее 100 нм, полученные электрохимическим методом, который достаточно прост в применении [22]. Чем выше приложенная нагрузка, тем значительнее проявляются противоизносные и антифрикционные свойства нанодобавки меди. При больших нагрузках, характерных для подшипников качения, коэффициент трения уменьшается по сравнению с чистым смазочным материалом, что и необходимо для замедления изнашивания узлов трения. Снижение коэффициента трения связано с тем, что

частицы наполнителя выстилают микронеровности трущихся поверхностей и снижают фактическое давление в контакте, при этом трение локализуется в слое высокопластичного металла – меди.

## **1.6 Вывод по главе 1**

Подшипники качения кронблока работают при высоких знакопеременных нагрузках, что снижает их долговечность. Для бесперебойной работы кронблока необходимо повышать срок службы его подшипниковых опор.

Методом повышения долговечности на стадии эксплуатации подшипников качения является применение новых, улучшенных смазочных материалов с различными присадками и добавками.

На основании проведенных информационно-патентных исследований и анализа работ, связанных с темой добавок к смазочным материалам, была поставлена цель работы: повышение срока службы подшипниковых опор кронблока модифицированными смазочными материалами.

Для выполнения поставленной цели решались следующие задачи:

- выполнить информационный и патентный поиск по тематике работы, проанализированы причины выхода из строя подшипниковых узлов;
- провести анализ методов повышения срока службы подшипниковых узлов;
- выполнить анализ существующих материалов, применяемых в качестве функциональных добавок к смазочным материалам;
- произвести расчет напряжений и давлений в зоне контакта подшипника;
- выполнить оценку режима работы подшипникового узла кронблока, на основании которой принимается решение по использованию модифицированного смазочного материала.

## **2 Влияние усталостных процессов на долговечность подшипников качения**

### **2.1 Понятие механической усталости**

Усталость - явление постепенного и необратимого изменения состава, строения и свойств материала под воздействием изменяющейся во времени нагрузки, приводящее к образованию усталостных трещин, взаимодействие и развитие которых завершается либо отделением и уносом с поверхности частиц материала, либо возникновением магистральной трещины и разрушением объекта - разделением его на части. Опасность разрушения деталей машин при многократно повторяющейся нагрузке, для которой наряду с величиной нагрузки решающее значение имеют ее частота и число циклов, известна с начала развития промышленного машиностроения в IX столетии [32].

«Термин усталость металлов означает, таким образом, поведение металлов, подвергаемых повторным напряжениям», – таково обобщение исследуемого понятия дал Г. Дж. Гаф в 1926 г. Здесь под поведением материала можно понимать что угодно: и повреждение, и трещины, и разрушение и т. п. –

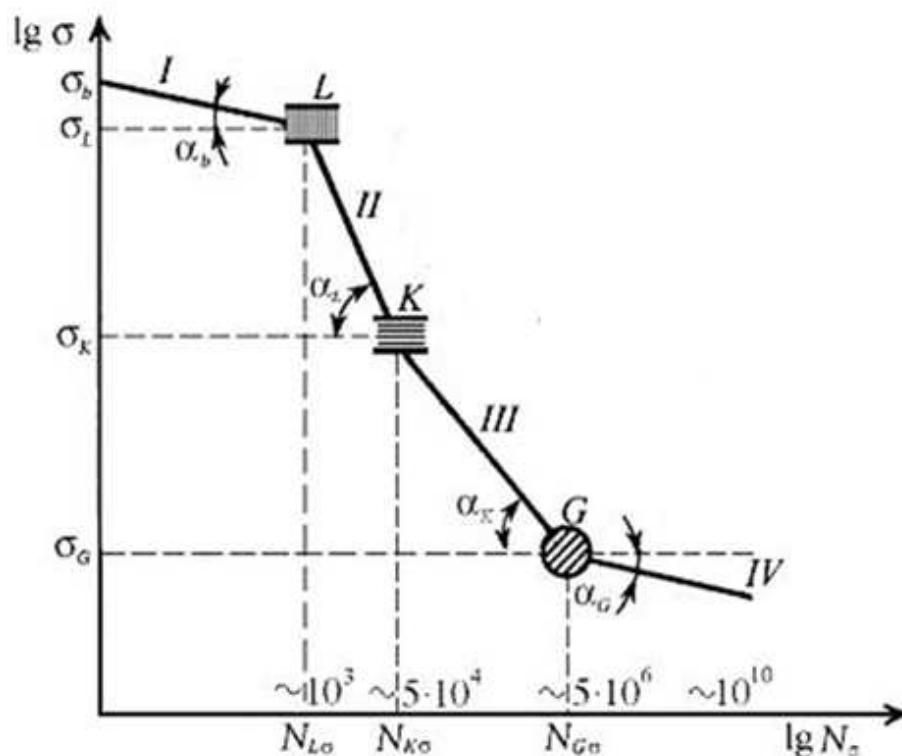
независимо от тех физических механизмов, которые обнаруживаются исследователями время от времени в некоторых конкретных условиях нагружения того или иного конкретного материала, в том числе и на разных масштабных уровнях (атомном, субмикро-, микро-, мезо-, макроуровне).

Обобщенное определение Гафа оказалось применимым и тогда, когда И. В. Крагельским был установлен (в 1939 г.) усталостный механизм изнашивания.

Усталость материала – процесс постепенного накопления повреждений в материале под длительным действием циклически изменяющихся во времени напряжений и деформаций, приводящих к изменению строения, механических и физических свойств материала, образованию трещин в материале и разрушению.

Поверхностное усталостное повреждение реализуется при контактном взаимодействии двух твердых тел, прижимаемых друг к другу контактной нагрузкой в процессе относительного движения; эти тела составляют специфический объект – пару трения.

Характеристикой сопротивления механической усталости является полная кривая усталости.  $0 \leq \sigma \leq \sigma_b$  МПа и  $1 \leq N_\sigma \leq 10^{10}$



Полная кривая усталости состоит из четырех (I, II, III, IV) характерных участков (областей) и имеет три ( $L$ ,  $K$ ,  $G$ ) точки перелома; координаты точек перелома дают соответствующие критические значения предельных напряжений и долговечностей (предел квазистатической усталости  $\sigma_L$ ,  $N_{L\sigma}$ ; предел малоциклового усталости  $\sigma_K$ ,  $N_{K\sigma}$ ; предел многоциклового усталости  $\sigma_G$ ,  $N_{G\sigma}$ ); I - квазистатическая усталость, II – малоцикловая усталость, III – многоцикловая усталость и IV – высокоресурсная усталость [33].

На практике чаще всего получают только кривую многоциклового усталости или кривой Вёлера [33]. По кривой усталости определяют все основные характеристики сопротивления материала повторно-переменным нагрузкам.

Изменение состояния материала при усталостном процессе отражается на его механических свойствах, макроструктуре, микроструктуре и субструктуре. Эти изменения протекают по стадиям и зависят от исходных свойств, вида напряжённого состояния, истории нагружения и влияния среды. На определённой стадии начинаются необратимые явления снижения сопротивления материала разрушению, характеризующиеся как усталостное повреждение.

Концепция усталостного разрушения поверхностей трения была предложена в 1952 г. выдающимся отечественным трибологом И. В. Крагельским [5, 6]. В трудах автора, его учеников и последователей она получила физическое обоснование, экспериментальное подтверждение, аналитическое выражение и практическую реализацию в виде методов расчета на износ. Согласно усталостной теории износа разрушение поверхностей происходит в результате многократного деформирования истираемого материала жесткими микронеровностями контртела при относительном перемещении трущихся тел.

## 2.2 Механизм усталостного разрушения

Механизм усталостного разрушения во многом связан с неоднородностью реальной структуры материалов (различие размеров, очертаний, ориентации соседних зерен металла; дефекты кристаллической решетки). Реальный технический металл имеет дефекты строения, в частности, точечные дефекты (например, вакансии) и линейные дефекты (например, дислокации). При контактировании твердых тел с шероховатыми поверхностями происходит внедрение более жестких микронеровностей в менее жесткое контртело. Под действием циклических напряжений относительное скольжение микронеровностей и дефектов сопровождается интенсивным деформированием поверхностных слоев. Деформации самих микронеровностей при этом в несколько раз меньше и ими можно пренебречь. На величину деформации поверхностных слоев существенное влияние оказывает напряженное состояние в зоне касания, зависящее от геометрического очертания микронеровностей, приложенной к ним нормальной нагрузки и механических свойств взаимодействующих тел. Интенсивность разрушения поверхностных слоев при трении сильно зависит от возникающих в них растягивающих напряжений. В связи с неоднородностью при переменных напряжениях на границах отдельных включений и вблизи микроскопических пустот и различных дефектов возникает концентрация напряжений [5, 6, 34].

Каждый выступ шероховатой поверхности "гонит" перед собой волну, деформируя материал, то есть при движении микронеровности перед ней возникает волна из деформированного материала поверхностного слоя, отдельные участки которого подвергаются сложным напряжениям. Выступ (микронеровность) сжимает материал перед собой, растягивая на некотором расстоянии впереди (гребень волны) и значительно растягивая позади себя за счет силы трения, которая складывается из деформационной и адгезионной составляющей. Из-за образования адгезионных связей, вследствие изменения

напряженного состояния увеличиваются сопротивление деформированию и сам деформируемый объем, так как высота волны тем больше, чем значительнее величина адгезии. Таким образом, каждое сечение истираемого тела под совместным действием нормальной и тангенциальной сил последовательно подвергается сжимающим и растягивающим напряжениям. Многократная знакопеременная деформация даже при небольшой нагрузке может привести к усталостному разрушению [5].

Поверхностные слои материала характеризуются наличием разного рода включений и повышенным содержанием в единице объема дефектов строения: дислокаций, вакансий микротрещин. Интенсивное их деформирование зарождает полосы течения. Полосы течения, возникающие в более деформированных участках поверхности трения, являются зонами повышенной концентрации дислокаций. Дислокации, перемещаясь внутри полос трения, скапливаются у границ зерен, включений, пересечений этих полос. Взаимодействие дислокаций в очагах скопления приводит к разрыхлению поверхностных слоев и появлению микропор [5,6].

Образующиеся в процессе трения в поверхностных слоях микропоры соединяются, что приводит к появлению микротрещин. Края трещины под действием переменной нагрузки притираются друг об друга, и поэтому зона роста трещины отличается гладкой (полированной) поверхностью. Усталостные трещины возникают на дефектах, которые всегда имеются в твердом теле. Они являются концентраторами напряжений и могут быть связаны как с несовершенством структуры твердых тел, так и с их повреждением в результате механических воздействий, тепловых напряжений и т.д. При возникновении трещин на поверхности качения, они расширяются вглубь.

Определяющее влияние на рост микро и малых трещин оказывают структурные барьеры (границы блоков, фрагментов, кристаллитов, включений), локализованные в объеме материала. Их воздействие приводит к тому, что рост трещин представляет собой серию периодических всплесков, соответствующих



их прорыву в смежные кристаллиты, и остановок, вызванных их эффективной блокировкой барьерами.

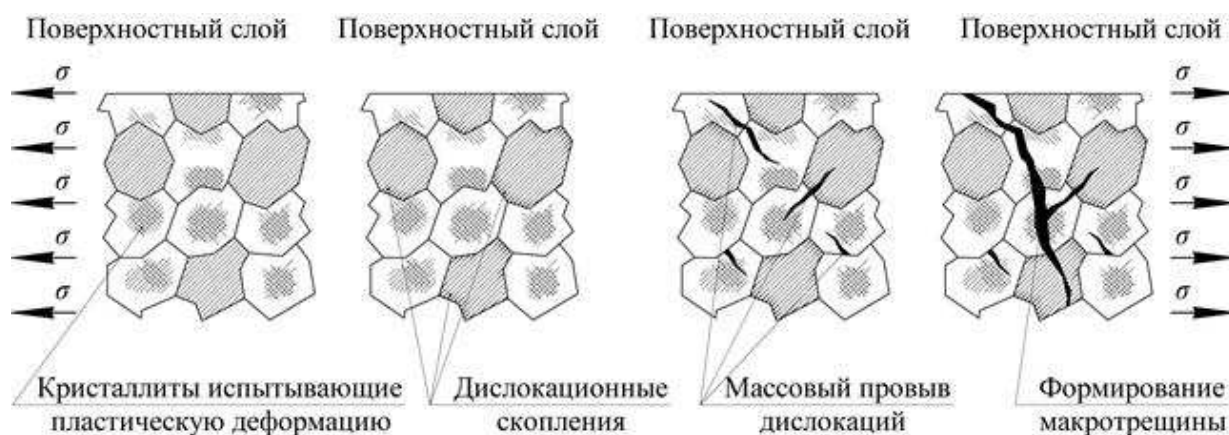
Распространяясь и взаимодействуя между собой, микротрещины обуславливают появление макротрещин, которые приводят к изнашиванию материала и образованию частиц износа. Происходит поверхностное разрушение материала. Возникают микроскопические выступы и впадины.

Важным признаком, характеризующим превращение малых трещин в макротрещины, является прекращение влияния микроструктурных барьеров на их рост. На этом этапе процесс разрушения локализуется в вершине наиболее быстро развивающейся макротрещины, продвигающейся по наименее прочным участкам материала.

При взаимодействии микровыступов дорожек и тел качения возникают значительные локальные напряжения, приводящие к пластичным деформациям и возникновению новых трещин.

Высокая концентрация напряжений у вершины трещины приводит к тому, что она развивается при напряжениях гораздо более низких, чем напряжения необходимые для преодоления структурных барьеров. Кроме того нагрев, происходящий при локальном разрушении размягчает материал, что, в свою очередь, облегчает рост макротрещины [5, 6].

По мере роста трещины поперечное сечение детали все больше ослабляется, и наконец, происходит внезапное хрупкое разрушение детали, при этом зона хрупкого долома имеет грубозернистую кристаллическую структуру (как при хрупком разрушении).



## 2.3 Виды усталостных разрушений

Износоусталостные повреждения имеют важное значение среди явлений, приводящих к отказам. Обобщение результатов исследований износоусталостных повреждений выполнено Л.А. Сосновским и Н.А. Махутовым [32, 33, 35].

В конце прошлого столетия возникла механика комплексного – износоусталостного повреждения. Согласно ГОСТ 30638-99, «наука об износоусталостных повреждениях и разрушении силовых систем машин и оборудования» называется трибофатика.

Силовой называют всякую механическую систему, которая воспринимает и передает повторно-переменную рабочую нагрузку и в которой одновременно реализуется процесс трения в любых его проявлениях: при скольжении, качении, проскальзывании, ударе и т.д. Рассматриваемые в данной работе подшипники качения – типичная силовая система.

Для силовых систем характерно комплексное – износоусталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений усталости, трения и изнашивания, эрозии, коррозии.

Износоусталостное повреждение – повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений усталости, трения, изнашивания или эрозии. Контактно-механическая усталость, фрикционно-механическая усталость, фреттинг усталость, коррозионно-механическая усталость – это различные проявления износоусталостного повреждения [35].

Процесс фреттинга является одним из видов контактного взаимодействия твердых тел при наличии нормальной и касательных составляющих сил от повторно-переменной внешней нагрузки и сил трения.

В процессе фреттинга обнаруживается сложная совокупность механических, физических, химических, тепловых и электрических процессов,

которые развиваются в зонах контакта сопряженных деталей при малых колебательных смещениях одной поверхности относительно другой.

Результатом развития фреттинг-процесса может быть:

- износ, если преимущественным является механическое разрушение поверхности (фреттинг-изнашивание);
- коррозионное повреждение, если преимущественными являются химические и электрохимические процессы (фреттинг-коррозия);
- сочетание фреттинг-коррозии и фреттинг-износа [35].

Износ при фреттинге является сильно локализованным на площадках контакта, а продукты разрушения поверхностных слоев остаются между трущимися телами: они перетираются и накапливаются в окрестностях площадок фактического контакта, что приводит к усилению их абразивного действия. Если фреттинг-процесс происходит на фоне циклического деформирования хотя бы одного из контактирующих тел, то говорят, что система работает на фреттинг-усталость. Фреттинг-повреждения интенсифицируют усталостный процесс. В случае фреттинг-усталости происходит взаимосвязанное развитие и фреттинга, и механической усталости. Их взаимодействие ведет к резкому снижению долговечности силовой системы [35].

Фрикционно-механическая усталость характерна для узлов трения на подшипниках скольжения, воспринимающих рабочую повторно-переменную нагрузку. Процесс трения скольжения, сопровождаемый износом, ведет, как правило, к снижению сопротивления усталости узла трения. Этому способствуют:

- изменение состояния поверхности элементов системы в зоне контакта (точнее, изменение геометрии поверхности и изменение физико-механических свойств материала);
- увеличение динамических нагрузок из-за неравномерного износа в многоопорных валах;

- рост напряжений вследствие уменьшения размеров поперечного сечения тела, передающего циклическую нагрузку, из-за его износа.

При многократном повторно-переменном деформировании поверхностного слоя в двух взаимно-перпендикулярных направлениях возникают усталостные трещины: поперек пути трения - под влиянием амплитудных значений растягивающих деформаций; параллельно поверхности - под влиянием растягивающих деформаций. Развитие пространственной системы трещин в результате фрикционной усталости завершается износом - отделением и удалением некоторого объема материала.

Если фрикционное повреждение происходит на фоне циклического деформирования хотя бы одного из контактирующих тел, говорят, что система работает в условиях фрикционно-механической усталости.

Коррозионно-механическая усталость – это процесс постепенного накопления повреждений металла в случае одновременного воздействия повторно-переменных нагрузок (деформаций) и агрессивной среды. Для коррозионно-механической усталости характерны множественные первичные трещины в пределах опасной поверхности. Это обуславливает многоочаговый и многолопастный характер излома, тогда как при усталости в воздухе обычным является одноочаговый излом. Кроме этого, чем больше агрессивность среды, тем меньше сопротивление усталости металла. При коррозионно-механической усталости реализуется рассеянный эффект множественного сдвига, окисления, переноса [35].

Контактно-механическая усталость наблюдается в узлах трения качения. Специфика контактного взаимодействия элементов при трении качения в отличие от трения скольжения состоит в том, что, во-первых, величина коэффициента трения примерно на порядок меньше, чем его значение при трении скольжения, и, во-вторых, контактная площадка сильно локализована, поэтому должна воспринимать относительно высокие удельные нагрузки [35].

В нормальном по отношению к поверхности трения направлении деформации являются упругими, а на некоторой глубине под поверхностью

трения обнаруживаются пластические деформации сдвига. В условиях знакопеременных сдвиговых деформаций пластические деформации приводят к возникновению остаточных напряжений в материале.

Для подшипников качения характерна контактная усталость. Это основная причина выхода подшипников из строя.

Характер напряженно-деформированного состояния материала в области контакта становится особым, как только начинается процесс трения качения. Во-первых, хотя контактная нагрузка и остается постоянной, но в области контактной площадки все компоненты нагружения становятся циклическими вследствие движения зоны контакта по дорожке качения. Во-вторых, в определенных областях возникают циклические напряжения растяжения. В этой связи процесс разрушения поверхностного слоя при трении качении описывается как контактная усталость.

Процесс контактной усталости во многом подобен процессу обычной усталости (образование и постепенное развитие трещин, зависимость долговечности и предела выносливости от ряда факторов и т. д.), однако он имеет и свои специфические черты. Они обусловлены тем, что в зоне контакта реализуется объемное напряженное состояние, имеют место резкие градиенты компонент напряжения, происходит локализация максимальных напряжений в небольших объемах металла [35]. Это приводит к резкому изменению степени и характера деформирования металла по мере углубления в его поверхность.

Если в поверхностном слое (особенно на вершинах микровыступов) наблюдается значительная пластическая деформация, то на глубине, всего в несколько раз превышающей размер контактной площадки, нормальные напряжения составляют лишь десятые или сотые доли от величины предела упругости. Кроме того, при контактной усталости характерно наличие двух опасных объемов: один - это тонкий поверхностный слой на площадке контакта, другой - это подповерхностная зона максимальных касательных напряжений, расположенных на глубине, зачастую меньшей, чем размеры

контактной площадки. При наличии больших контактных усилий на контактной площадке эти две зоны сближаются и даже могут слиться в одну.

Контактная усталость материала определяется его физико-механическими свойствами, скоростью качения, режимом нагружения и смазочным материалом.

Условия образования трещин при контактной усталости и процессы их развития зависят от схемы контактного нагружения. Процесс трещинообразования также определяется условиями контакта [35].

В условиях чистого качения (при коэффициенте трения  $0,005 < f < 0,025$ ) трещины формируются в подповерхностной зоне; развиваясь, они выходят на поверхность. Образование таких трещин связывают с действием максимальных касательных напряжений  $\tau_{\max}$  на глубине  $h \approx 0,7...0,8b$  ( $b$  - полуширина площадки контакта).

В условиях качений с проскальзыванием (при  $0,025 < f < 0,05$ ) металл повреждается как на поверхности, так и на глубине. Хотя величина  $\tau_{\max}$  в поверхностном слое может быть и больше, чем напряжения на поверхности, однако поверхностное разрушение интенсифицируется окислительными и тепловыми процессами.

При свободном скольжении (при  $f > 0,05$ ) трещина растет, как правило, с поверхности.

Существует два характерных вида поверхностного разрушения при контактной усталости: образование питтингов и изнашивание отслаиванием. Последнее проявляется в виде отделения тонких чешуек или пластинок охрупченного металла. Такое разрушение возможно, если возникает подповерхностная трещина, параллельная плоскости качения, развитие которой завершается выходом на поверхность. Питтинг представляет собой выкрашивание отдельных мест поверхности, иногда сопровождается выколом (отколом) довольно больших фрагментов металла. Размеры ямок выкрашивания и их число увеличивается с ростом числа циклов нагружения.

Образование питтингов возможно, если развивается система наклонных трещин [35].

На распространение выкрашивания заметно влияют аспекты макрогеометрии, например, развитие геометрии контакта на дорожке качения и возникающая концентрация напряжения в подшипнике качения.

Прослеживаются две отличительных стадии развития выкрашивания из-за повреждений поверхности. Первая – достаточно медленное развитие поперечного разрушения дорожки качения, вторая – более быстрое продольное распространение повреждения.

Контактная усталость при качении – типичная причина выхода из строя подшипников качения и других подобных деталей механизмов.

Усталостное выкрашивание деталей подшипников качения (при нормальных условия работы) развивается сравнительно медленно и сопровождается увеличением шума и вибрации подшипников, что позволяет обнаружить повреждения и заменить подшипник до его полного разрушения. Выкрашивание первоначально развивается на двух краях начального повреждения, разрастаясь поперёк дорожки качения, а потом в продольном направлении [35,36, 9]

Эффективность работы подшипника зависит, в конечном счете, от напряженно-деформированного состояния контактирующих поверхностей. В свою очередь, напряжения, и соответствующие им деформации, при прочих одинаковых условиях работы существенно зависят от формы профиля контактирующих поверхностей качения.

## **2.4 Влияние сил трения на процессы усталости**

На изнашивание взаимодействующих твердых тел существенно влияет сила трения.

В процессе трения под влиянием возникающих высоких температур и больших динамических воздействий происходит существенное изменение

поверхностных слоев материалов. Необходимость учитывать явления, протекающие в поверхностных слоях при трении, привела к формулированию понятия о трехстадийном развитии процесса изнашивания:

- 1) взаимодействие поверхностей;
- 2) изменение под влиянием сил трения свойств поверхностных слоев контактирующих материалов;
- 3) разрушение и отделение частиц износа.

Наиболее важным этапом трехстадийного процесса является взаимодействие поверхностей. При его оценке необходимо учитывать двойственную природу трения и дискретность контакта.

Многочисленными исследованиями показано, что отделение материала является следствием накопления повреждений, связанного с многократным знакопеременным воздействием. Понятия много- и малоциклового усталости и обусловленная условиями взаимодействия зависимость распределения напряжений и деформаций по глубине объясняют многообразие частиц износа (их размер, форму, состав) и интенсивность отделения их от поверхности.

Обобщая многие современные теоретические представления и экспериментальные данные, можно отметить, что процессы зарождения и развития усталостных повреждений обусловлены явлениями генерирования, перемещения и накопления подвижных дефектов в теле при его циклическом деформировании. Энергия (тепловая и механическая) и время (число циклов нагружения) являются двигателем этих явлений и процессов [34].

Под внешним трением понимается комплекс явлений в зонах контактов микронеровностей двух твердых тел при их движении друг относительно друга, связанных с возникновением силы трения.

Геометрическое место точек соприкосновения тела и контртела вследствие их местного деформирования при силовом взаимодействии – сжатии контактной нагрузкой называют контактной площадкой. Как только начинается относительное движение тела и контртела, на контактной площадке возникает внутренняя сила сопротивления этому движению – сила трения.



Значит, сила трения – это сила сдвига в области физического контакта тела и контртела [36].

По кинематическому признаку внешнее трение подразделяют на трение: скольжения, качения и верчения.

Сила трения качения по крайней мере в 10 раз меньше силы трения скольжения, так как при качении фактическая площадь касания трущихся тел меньше. Трение качения наименее энергозатратно. Качение определяется как вид движения контактирующих тел с некоторой относительной угловой скоростью вокруг оси, лежащей в касательной плоскости. Процесс качения состоит в том, что поверхности соприкасающихся и взаимно перемещающихся тел непрерывно меняют участки контакта без видимого скольжения при повороте одного или обоих тел относительно осей [36]. Существенный вклад в раскрытие природы и учения о трении качения внесли И.В. Крагельский, С.В. Пинегин [5, 6, 36, 9].

Специфика контактного взаимодействия тела и контртела при трении качения состоит в том, что контактная площадка сильно локализована, поэтому должна воспринимать относительно высокие удельные нагрузки. Возникновение силы трения при качении обусловлено скольжением сопряженных поверхностей.

Процесс трения на базе молекулярно-механической теории складывается из деформационной или механической части и части, которая зависит от взаимодействия трущихся тел. Сила сопротивления относительному скольжению складывается из сопротивления, обусловленного деформированием тонкого поверхностного слоя, внедрившимися микронеровностями и сопротивлением, возникающим вследствие межмолекулярных взаимодействий в достаточно сближенных участках твердых тел. При этом процесс трения можно рассматривать как потерю механической энергии за период относительного движения соприкасающихся областей материала [34].

Известно, что контакт трущихся тел является всегда дискретным и реализуется в зонах фактических пятен касания. Сближение трущихся тел происходит под нагрузкой в соответствии с микрогеометрией поверхностей тел, и при трении образуются фрикционные связи в направлении движения и новые пятна фактического контакта. Пятно контакта испытывает многократное воздействие других пятен контакта. В этих местах контакта могут образовываться адгезионные связи благодаря молекулярным взаимодействиям между телами трения. В результате в материале образуется трещина и происходит его разрушение [5, 6].

Следовательно, основным процессом, возникающим при трении, является механическое взаимодействие поверхностей твердых тел, что приводит к изнашиванию.

Процессы повреждаемости при трении качении локализуются: либо в очень тонком поверхностном слое, либо в подповерхностных зонах.

Процессы изнашивания обусловлены знакопеременными циклическими деформациями (напряжениями) при трении и, значит, разрушение поверхностных слоев материала в таких специфических условиях контактного взаимодействия имеет усталостный характер. Значит, сила трения влияет на усталостный износ следующим образом: чем больше коэффициент трения, тем интенсивнее происходит усталостное изнашивание.

Ранее качение было определено как движение (вращение) двух контактирующих тел, относительно осей, параллельных их общей касательной плоскости. В системе отсчета, движущейся вместе с точкой контакта, поверхности «протекают» через область контакта с тангенциальными скоростями. Если эти тангенциальные скорости различны и длина пути, который проходит нагруженный ролик при качении, не равен длине окружности составленной из точек касания, то качение сопровождается проскальзыванием. Качение без проскальзывания обычно называется «свободным» [37].

Разница между упругими деформациями двух тел в области сцепления приводит к реализации макропроскальзывания тел, называемого скольжением. Явление скольжения было описано О. Рейнольдсом. Он обнаружил, что область контакта разбивается на зоны сцепления и микропроскальзывания, определяемые силами трения и упругими деформациями. Микропроскальзывание, появляющееся при трении в области взаимодействия, является одним из источников сопротивления перекачиванию тел [37].

В случае проскальзывания тел качения усталостные разрушения деталей подшипника будут начинаться на поверхности. Снижение силы трения на контакте будет менять форму образования усталостных трещин на глубинную, что увеличивает время эксплуатации подшипниковых опор до начала усталостного разрушения дорожек и тел качения подшипников [38].

Относительное проскальзывание поверхностей качения приводит к изнашиванию тел качения и дорожки качения вращающегося кольца подшипника. Проскальзывание чаще возникает в роликоподшипниках. Большое влияние на проскальзывание роликоподшипников оказывает осевой зазор роликов относительно направляющих бортов. При малом или увеличенном осевом зазоре вращение роликов сопровождается их повышенным трением. Оптимальный осевой зазор роликов относительно направляющих бортов равен 0,02-0,03 мм.

Для уменьшения или предотвращения проскальзывания и изнашивания поверхностей качения целесообразно:

- повысить нагрузку на подшипник;
- уменьшить радиальный зазор в подшипнике;
- ограничить допуск на шахматное расположение гнезд сепаратора величиной не более 0,05 мм;
- не применять смазочные материалы с повышенной вязкостью.

Проскальзывание может быть устранено или существенно снижено путем уменьшения числа роликов в подшипнике [39].

На силу трения в подшипниках качения влияют вязкость смазочного материала, трение в сепараторе подшипника, размер тел качения, шероховатость поверхности и др.

Значение коэффициентов трения в различных видах подшипников качения находятся в диапазоне 0,002-0,008 [12].

При трении в смазочных средах на процесс усталостного разрушения может оказывать существенное влияние смазочный материал.

Взаимодействие между смазкой и повреждениями поверхности, определяющими места концентрации напряжений, очень важно для понимания явлений поверхностной усталости подшипников качения.

Скорость развития усталостных трещин зависит от напряженного состояния и вида возникающих деформаций поверхностных и приповерхностных слоев, свойств смазочного материала и толщины смазочной пленки, появлением микропластических деформаций при упругом контактировании деталей.

## **2.5 Вывод по главе 2**

Подшипники качения чаще всего выходят из строя вследствие усталости. Усталость – это процесс накопления повреждений в материале под длительным действием циклических напряжений и деформаций, приводящих к изменению строения, механических и физических свойств материала, образованию трещин в материале и разрушению. Существует несколько видов усталости, например, контактно-механическая усталость, фрикционно-механическая усталость, фреттинг усталость, коррозионно-механическая усталость. Для подшипников качения характерна контактная усталость.

Силы трения непосредственно влияют на процесс усталости. Снижение силы трения на контакте будет менять форму образования усталостных трещин на глубинную, что увеличивает время эксплуатации подшипниковых опор до начала усталостного разрушения дорожек и тел качения подшипников.

Для снижения износа при усталости необходимо уменьшать силу трения. Этого можно достичь при использовании специальных присадок (антифрикционных), введенных в пластичный смазочный материал.

Кроме сил трения на процесс усталости влияет геометрия контакта на дорожке качения и возникающая концентрация напряжения в подшипнике качения. Для оценки развития износоусталостных повреждений необходимо решить задачу о нахождении напряжений и давлений на площадки контакта а так же определить размеры и геометрию площадки контакта.

### **3 Расчет подшипника качения при смазывании пластичными смазочными материалами**

#### **3.1 Расчет площадки контакта ролик/кольцо**

Для того, чтобы оценить условия взаимодействия тел при трении качении используют как экспериментальные методы, так и методы математического моделирования. Известные в наше время подходы к решению этой проблемы можно найти в монографиях К. Джонсона, И. Г. Горячевой, С.В. Пинегина [9, 36, 37].

Вследствие деформируемости реальных тел их контакт осуществляется не в точке, а внутри некоторой области контакта, которая при наличии микрорельефа поверхности состоит из совокупности дискретных пятен контакта. В области взаимодействия поверхностей и в ее окрестности возникает напряженное состояние, которое оказывает существенное влияние на процессы трения и изнашивания.

В узлах трения характеристики контактного взаимодействия изменяются во времени по мере накопления деформаций или изнашивания поверхности. В контактных задачах с трением важна история нагружения, а не только текущие значения нормальных и сдвиговых нагрузок [40].

Наличие контактного трения при циклическом нагружении в общем случае приводит к снижению циклической прочности изделий;

Одной из важнейших задач является определение и анализ напряженно-деформированного состояния систем, в которых одновременно реализуется контактное взаимодействие с трением (качения, скольжения) между твердыми деформируемыми телами и неконтактное (объемное) деформирование по крайней мере одно из элементов системы [41].

Напряжения, возникающие на площадке контакта при передаче сжимающих усилий через одно тело на другое, называются контактными напряжениями. От контактных напряжений зависит состояние поверхности, возникновение адгезионных связей в области взаимодействия, накопление поврежденности поверхностных слоев и их разрушение.

Задачу определения напряжений, возникающих при сжатии двух соприкасающихся тел, называют контактной. Решения контактных задач позволяют изучить зависимость контактных характеристик (контактные давления, форму и размер области контакта, сближение тел) и напряженного состояния вблизи области взаимодействия от нагрузки, приложенной к контактирующим телам, формы поверхностей, механических свойств взаимодействующих тел и условий контакта (наличия трения) [41].

Характерным условием нагружения деталей подшипников качения является ограниченность величины площадок соприкасания деталей, через которые передаются рабочие усилия от одного элемента к другому.

Расчет контактирующих деталей подшипников, а именно напряженно-деформированного состояния дорожки качения колец подшипников хорошо описывается классической теорией контактного взаимодействия.

Общая контактная задача была решена в начале Х. Герцем и развита затем рядом исследователей: А.Н. Динником, Н.М. Беляевым, И.Я. Штаерманом, Л.А. Галиным, Б.С. Ковальским и другими, работы которых дают возможность вычислить напряжения и перемещения в упругих телах на площадках контакта [40, 37].

При взаимодействии двух цилиндров, имеющих два радиуса кривизны, каждый, начальное касание происходит в точке. Если один радиус кривизны, тогда контакт происходит по линии. В силу своих упругих свойств тела деформируются и создают площадки контакта конечных размеров. В случае точечного контакта площадка приобретает форму эллипса. В случае касания по линии форма площадки становится прямоугольной [41,40, 42].

Для определения геометрии площадки контакта, распределения давления на ней и нахождения составляющих напряженного состояния в околоконтактной зоне с приемлемой точностью, обычно применяется теория Герца-Беляева [43]. Однако в случае прямоугольной площадки эта теория имеет смысл только для средней части цилиндра конечной длины, так как на краях появляется резкое увеличение контактных давлений обусловленной краевым эффектом, который вызывает повышение напряжений по краям линий, ограничивающих область контакта, и не определяется методиками, изложенными в работах отечественных и зарубежных ученых [42]. Для учета краевых эффектов необходимо привлекать численные методы на основе программных комплексов. Будем считать, что краевые эффекты распространяются на небольшие участки контактных линий.

Задачи об упругом контакте деталей простой формы (в нашем случае цилиндров) имеют решения в замкнутой форме. В такой задаче рассматриваются только местные напряжения и деформации в зоне контакта.

Рассмотрим область контакта между цилиндрическим роликом и поверхностью качения внутреннего кольца подшипника качения [39].

На расстоянии  $\xi$  от плоскости, которая проходит через оси цилиндров берем две точки  $A_1$  и  $A_2$  (рисунок 19). Ввиду того, что первоначальный контакт цилиндрических тел происходит по линии, то площадка в зоне контакта имеет прямоугольную форму. Такую площадку прямоугольной формы еще называют герцевской.

Контакт цилиндров по линии, параллельной их осям и проходящим через точку  $B$ , расстояние между точками  $A_1$  и  $A_2$  вдоль оси  $y$ :

$$\eta_1 + \eta_2 \approx \frac{\xi^2}{2R_1} + \frac{\xi^2}{2R_2} = \frac{\xi^2}{2R},$$

(1)

где  $R_1$  и  $R_2$  — радиусы первого и второго цилиндров;  $R$  — средний радиус кривизны,

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (2)$$

Площадка контакта образована упругими деформациями. Под воздействием нагрузки  $p$  произойдет деформация цилиндров в зоне контакта, а их оси переместятся к этой зоне на величины  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ . Общее кинематическое перемещение осей координат, связанных с цилиндрами,  $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$ . Точки  $A_1$  и  $A_2$  займут при этом новое положение  $A'_1$  и  $A'_2$ .

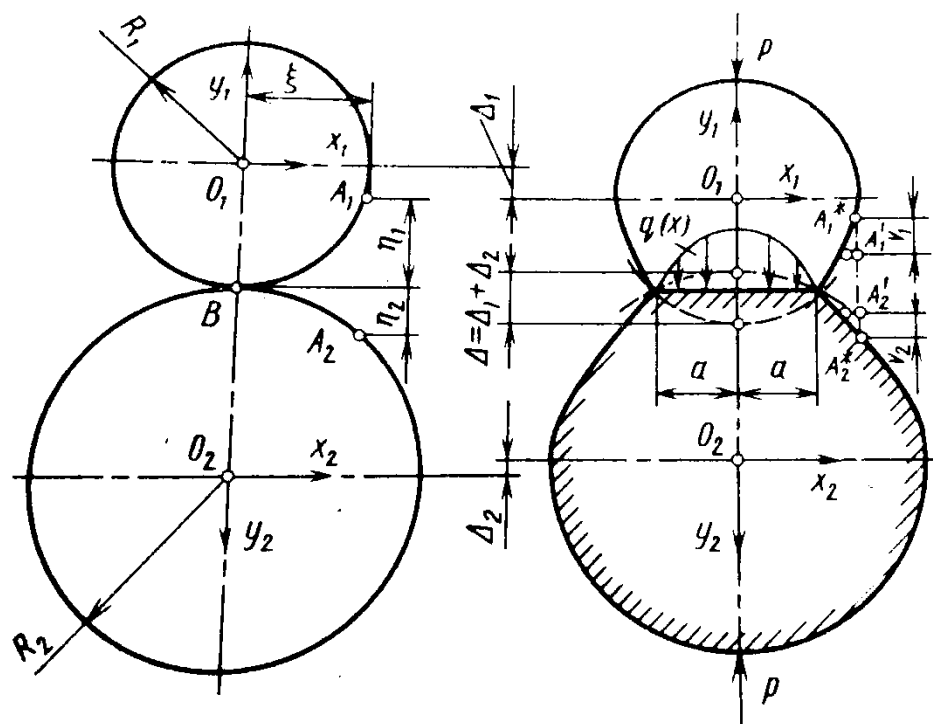




Рисунок 19 – К расчету контактирующих цилиндров

Давление в зоне контакта деформирует близлежащие неконтактирующие поверхности цилиндров и точки  $A_1'$  и  $A_2'$ , получив перемещения  $v_1$  и  $v_2$ , займут положение  $A_1^{\dot{}}$  и  $A_2^{\dot{}}$ .

Если в зоне контакта полуширина полосы контакта  $a \geq \xi$ , то точки  $A_1^{\dot{}}$  и  $A_2^{\dot{}}$  совместятся, поэтому

$$\Delta_1 - v_1 + \Delta_2 - v_2 = \Delta - v_1 - v_2 = \eta_1 + \eta_2 = \frac{\xi^2}{R}. \quad (3)$$

Соотношение (3) представляет собой условие совместности перемещений контактирующих точек цилиндров и показывает, что кинематические перемещения цилиндров под нагрузкой компенсируются их смещениями в результате деформации.

Условие равновесия имеет вид

$$\int_a^{-a} q(x) dx = p \quad (4)$$

Для решения задачи необходимо выразить смещение в уравнении (3) через контактные давления.

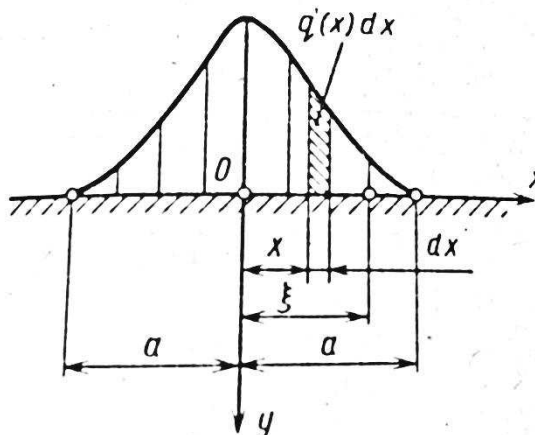


Рисунок 20 – К расчету перемещений точек полуплоскости

Так как ширина полосы контакта мала по сравнению с радиусами цилиндров, то каждый из них можно рассматривать как упругую полуплоскость под действием давления  $q(x)$ .

Смещение точки  $A$  с координатой  $x=\xi$  (рисунок 20) можно вычислить, используя известное решение задачи Фламана о действии силы на полуплоскость:

$$v_i = \frac{2(1-\nu_i^2)}{\pi E_i} \left[ \int_{-a}^a q(x) |\xi - x| dx + \left( \frac{1}{2 - (1-\nu_i^2)} - \ln R_i \right) p \right], \quad (5)$$

где  $E_i$  и  $\nu_i$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона  $i$ -го цилиндра.

Подставив соотношение (5) в условие (3) и учитывая (4), получим

$$(\Theta_1^i + \Theta_2^i) \int_{-a}^a q(x) |\xi - x| dx = \frac{\xi^2}{R} + C, \quad (6)$$

где

$$C = (\Theta_1^i + \Theta_2^i) \cdot \left[ \ln \left( R_1 R_2 - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{1-\nu_1} + \frac{1}{1-\nu_2} \right) \right) \right] p - \Delta;$$

$$\Theta_1^i = \frac{2}{\pi E_1} (1 - \nu_1^2); \Theta_2^i = \frac{2}{\pi E_2} (1 - \nu_2^2) \quad (7)$$

Если продифференцируем уравнение (6) по  $\xi$ , то получим

$$\left(\Theta_1^{\dot{i}} + \Theta_2^{\dot{i}}\right) \int_{-a}^a \frac{q(x)}{\xi - x} dx = 2 \frac{\xi}{R}. \quad (8)$$

Задача сводится к нахождению функции  $q(x)$ , удовлетворяющей условию (4) и уравнению (8) при всех значениях  $-a \leq x \leq a$ .

Можно показать, что этим требованиям будет удовлетворять выражение

$$q(x) = \frac{q_{\max}}{a} \sqrt{a^2 - x^2}. \quad (9)$$

$$q_{\max} = \frac{2p}{\pi a}; \quad (10)$$

$$a = \sqrt{pR(\Theta_1^{\dot{i}} + \Theta_2^{\dot{i}})}. \quad (11)$$

Подставляя в равенство (10) и (11) значения входящих в них величин получим

$$q_{\max} = 0,798 \sqrt{\frac{p \frac{R_1 + R_2}{2 R_1 R_2}}{\Theta_1 + \Theta_2}}; \quad (12)$$

$$a = 0,798 \sqrt{p \frac{R_1 + R_2}{2 R_1 R_2} (\Theta_1 + \Theta_2)}, \quad (13)$$

где

$$\Theta_1 = \frac{\pi}{2} \Theta_1^{\dot{i}}; \quad \Theta_1^{\dot{i}} = \frac{1 - v_1^2}{E_1}; \quad \Theta_2 = \frac{\pi}{2} \Theta_2^{\dot{i}}; \quad \Theta_2^{\dot{i}} = \frac{1 - v_2^2}{E_2}. \quad (14)$$

По формуле (12) максимальное давление (напряжение) в зоне контакта ролик-кольцо равно

$$q_{\max} = 0,798 \sqrt{\frac{417 \cdot 10^3 \cdot 56 \cdot \frac{28+220}{2 \cdot 28 \cdot 220}}{\frac{1-0,3^2}{2,11 \cdot 10^{11}} + \frac{1-0,3^2}{2,11 \cdot 10^{11}}}} = 186,29 \text{ МПа.}$$

Полуширина площадки контакта ролик-кольцо по формуле (13) равна

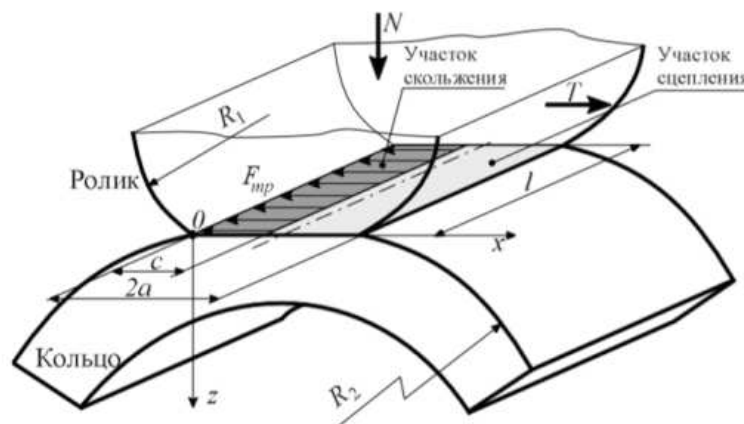
$$a = 0,798 \sqrt{417 \cdot 10^3 \cdot 56 \cdot \frac{28+220}{2 \cdot 28 \cdot 220} \left( \frac{1-0,3^2}{2,11 \cdot 10^{11}} + \frac{1-0,3^2}{2,11 \cdot 10^{11}} \right)} = 0,0016 \text{ мм.}$$

Площадка контакта имеет ширину  $2a = 0,0032$  мм и длину  $l$ , равную длине ролика – 27 мм.

Область контакта, как было упомянуто ранее, состоит из двух зон (рисунок 21). Первая зона, расположенная на стороне набегания цилиндра, является зоной сцепления, другая на выходе – зоной проскальзывания. Ширина участка скольжения, может быть определена из следующей формулы:

$$\frac{c}{a} = 1 - \frac{1}{\pi} \arctg \frac{1-2\nu}{f(2-2\nu)}, \quad (15)$$

где  $f$  - коэффициент трения скольжения.



Оценка влияния контактных напряжений на долговечность проводится с учетом силы трения, возникающей при взаимодействии тел. Максимальные касательные напряжения  $\tau_{max}$  связаны с увеличением силы трения и повышают значения нормальных напряжений на площадке контакта, что приводит к появлению усталостного изнашивания поверхностей.

Максимальные касательные напряжения находятся по формуле

$$\tau_{max} = 0,304 \cdot q_{max} \quad (16)$$

$$\tau_{max} = 0,304 \cdot 186,29 \cdot 10^6 = 56,63 \text{ МПа}$$

Глубина залегания  $\tau_{max}$

$$h_{\tau max} = 0,786 \cdot a \quad (17)$$

$$h_{\tau max} = 0,786 \cdot 0,0016 = 0,0013 \text{ мм}$$

Присутствие силы трения перемещает точку, в которой касательные напряжения будут максимальными, к поверхности.

При увеличении сил трения на участке скольжения уменьшается глубина, на которой располагается точка максимальных касательных напряжений, происходит ее приближение к поверхности в направлении действия силы трения.

При одновременном действии касательных и нормальных напряжений наиболее значимыми при определения долговечности подшипников качения по критерию усталостного изнашивания являются не максимальные касательные напряжения на глубине, а поверхностные напряжения на контуре контакта, непосредственно связанные с силами трения.

Максимальные касательные напряжения, связанные с увеличением силы трения, повышают значения нормальных напряжений на площадке контакта. Такой рост приводит к появлению усталостного изнашивания поверхностей [38, 31]. Если на участке скольжения выполняется закон трения Кулона – Амонтона, то касательные и нормальные нагрузки связаны зависимостью:

$$\tau(x) = f \cdot \sigma(x), \quad (18)$$

где  $\tau(x)$  – тангенциальные напряжения;  $\sigma(x)$  – нормальные напряжения;  $f$  – коэффициент трения.

Из формулы (18) видно, чтобы снизить воздействие усталости, необходимо снижать коэффициент трения.

Для примера, были взяты графики зависимости изменения нормальных и касательных напряжений для заданной радиальной нагрузки 2,5 кН, построенных с помощью компьютерного моделирования [38].

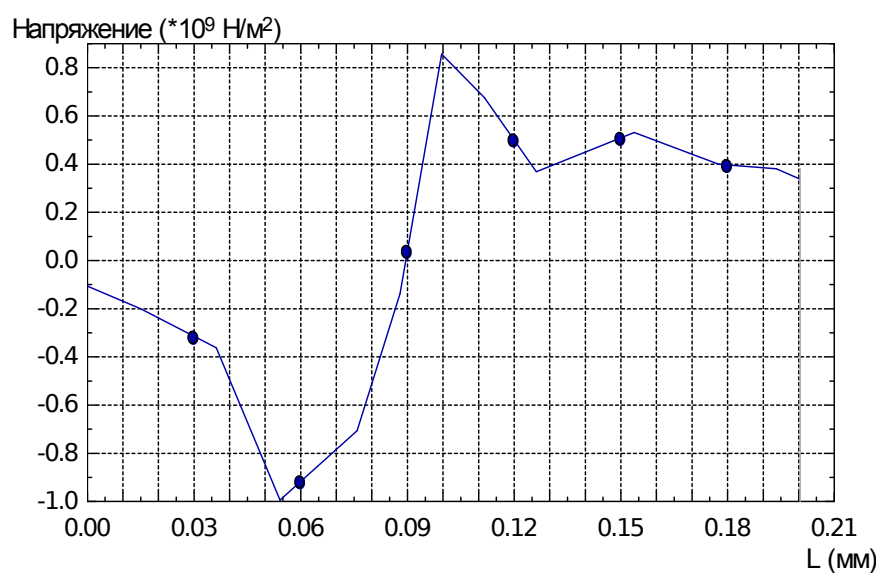
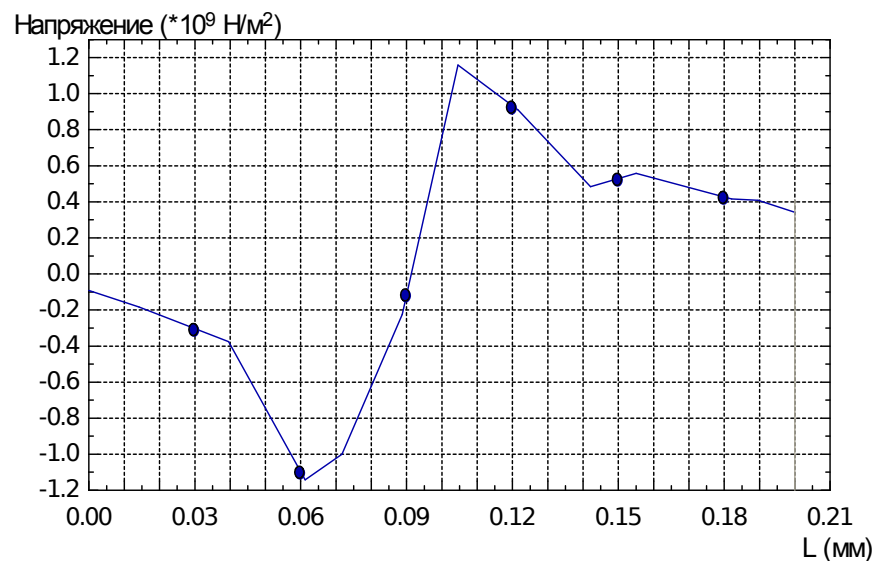
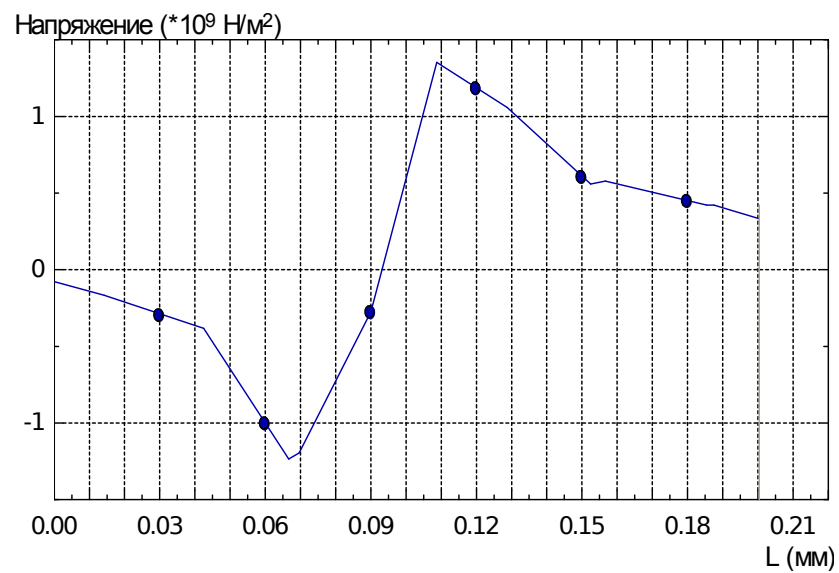


Рисунок 22 - Зависимости распределения касательных напряжений по ширине площадки контакта при коэффициентах трения 0,09; 0,11 и 0,13 соответственно

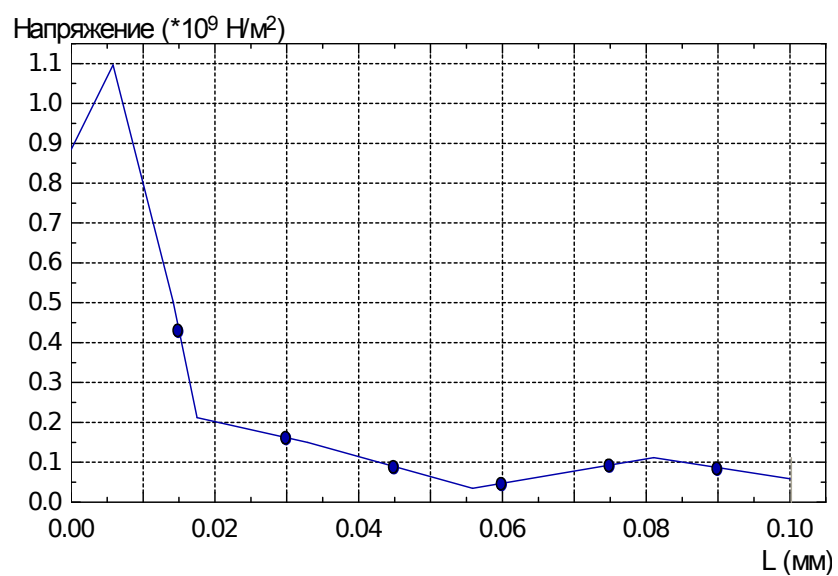
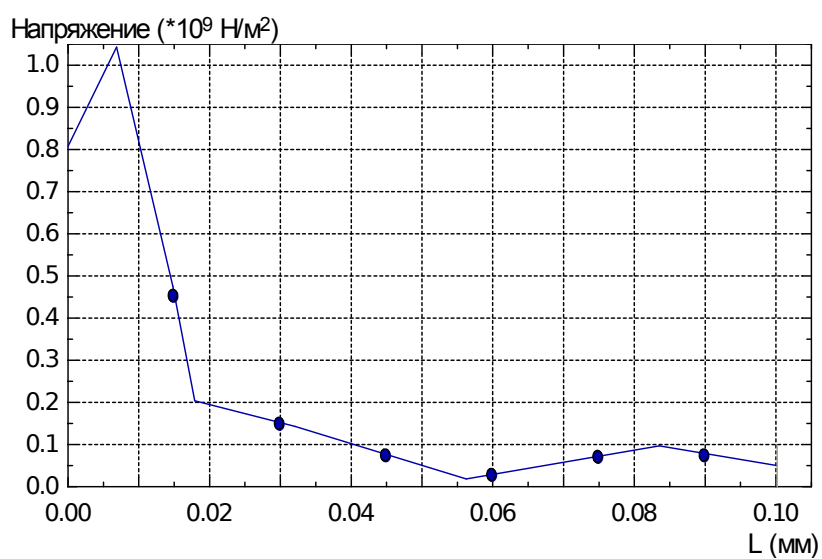
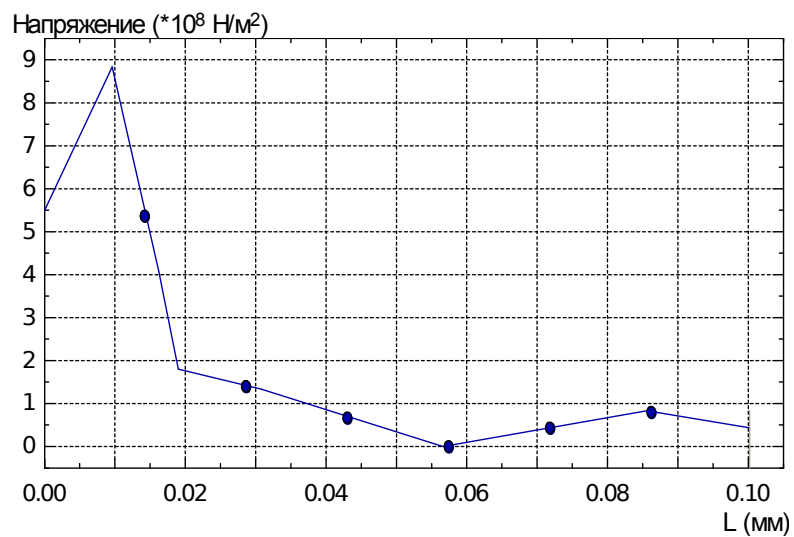


Рисунок 23 - Зависимости распределения нормальных напряжений по глубине кольца подшипника при коэффициентах трения 0,09; 0,11 и 0,13 соответственно



Можно заметить на графиках, что при увеличении сил трения на участке скольжения уменьшается глубина, на которой располагается точка максимальных касательных напряжений, происходит ее приближение к поверхности, в направлении действия силы трения, а поверхностное напряжение увеличивается. Это сокращает время эксплуатации подшипниковых опор из-за начала усталостного разрушения дорожек и тел качения подшипников.

Скорость развития усталостных трещин зависит от напряженного состояния и вида возникающих деформаций поверхностных и приповерхностных слоев, свойств смазочного материала и толщины смазочной пленки, появлением деформаций при упругом контактировании деталей.

Чтобы решить данный вопрос и реализовать стабильную и продолжительную работу узлов с трением качения, можно применить новые смазочные материалы с высокими антифрикционными свойствами.

Чтобы правильно подобрать эффективные присадки к смазочным материалам необходимо определить режим смазки для узла трения.

### **3.2 Расчет режима смазки подшипника качения**

В отличие от скольжения при качении продолжительность контактирования какой-либо неровности, принадлежащей одной поверхности, с элементами другой поверхности резко сокращается. Как указано в работе Т. Тальяна [44], относительная доля времени отсутствия контактирования возрастает с усилием гидродинамического эффекта, достигая 100% при жидкостном трении. При неполностью жидкостном трении она находится между 0 и 100%, причем имеется явно выраженная зависимость между долей времени отсутствия контакта и отношением толщины смазочного слоя к среднему квадратическому отклонению профиля поверхностей трения [44].

Если просуммировать все имеющиеся результаты экспериментальных и теоретических работ по этому вопросу, то в качестве параметра  $\lambda$ ,

характеризующего режим трения в контакте качения, следует принять следующее отношение:

$$\lambda = \frac{h_0}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}}, \quad (19)$$

где  $R_{a1}$  и  $R_{a2}$  – средние арифметические отклонения профиля контактирующих поверхностей.

Результаты экспериментов Т. Тальяна показали, что при  $\lambda < 1$  действует режим граничной смазки, значительно повреждаются поверхности трения и нельзя обеспечить работоспособность подшипника [44].

При  $1 < \lambda < 1,5$  происходит изнашивание поверхности. В этих условиях существует смешанное трение – сочетание граничного и жидкостного; при этом долговечность подшипника может иногда быть несколько меньше расчетной.

При  $1,5 < \lambda < 3$  кратковременно возникает контактное трение, однако в целом режим смазки близок к жидкостному, и контактно-гидродинамическая теория смазки уже дает вполне приемлемые и подтвержденные практикой результаты. Долговечность подшипника здесь равна или даже больше расчетной.

При  $3 < \lambda < 4$  смазка почти полностью жидкостная, изнашивание крайне незначительно; долговечность существенно превышает расчетную.

При  $\lambda > 4$  смазка полностью жидкостная и долговечность подшипника, как минимум, вдвое превышает расчетную.

Автором Коднир Д.С. [44] предложен несколько иной метод расчета критерия для определения влияния масла и рабочей температуры на работоспособность подшипника.

Критерий  $\lambda$  рассчитывается по формуле (20) и сопоставляется с заданными желательными значениями. При несоответствии и необходимости увеличить критерий переходят к другой смазке и к иному температурному уровню за счет применения более интенсивного охлаждения подшипника.

Критерий  $\lambda$  имеет вид

$$\lambda = K_0 \frac{0,176}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}} d_m^{0,55} (d_m n)^{0,75} \nu P_0^{0,15}, \quad (20)$$

где  $K_0$  – конструктивный коэффициент, зависящий от типа подшипника (для шарикоподшипников радиальных и радиально-упорных однорядных всех серий при  $\alpha = 12...36^\circ$   $K_0$  равен соответственно 70 и 75; для роликоподшипников всех серий  $K_0 = 100$ );  $\nu$  – параметр масла ( $\nu = \mu_0^{0,75} \alpha^{0,6}$  определяется в зависимости от температуры);  $P_0$  – эквивалентная статическая нагрузка, Н;  $d_m$  – средний диаметр подшипника

$$d_m = 0,5(d + D), \quad (21)$$

где  $d$  – внутренний диаметр подшипника, мм;  $D$  – наружный диаметр подшипника, мм.

$$d_m = 0,5(220 + 340) = 280 \text{ мм.}$$

Параметр  $\lambda$  пригоден в первую очередь для оценки влияния минеральных и синтетических масел на долговечность подшипника качения. При применении пластичных смазочных материалов параметр  $\lambda$  пригоден для оценки вязкости того масла, на базе которого изготавливается соответствующий пластичный смазочный материал. В п. 1.5 указано, что пластичная смазка Литол 24 представляет собой смесь масел: индустриальное масло И-50А и веретенное АУ в отношении 3:1, в расчеты берем исходную вязкость масла И-50А при  $50^\circ\text{C}$   $\nu_{50} = 32 - 35 \text{ мм}^2/\text{с}$ .

Среднее арифметическое отклонение профиля контактирующих поверхностей равно 1,25 мкм.

Эквивалентная статическая нагрузка рассчитывается по формуле

$$P_0 = X \cdot R + Y \cdot A ; \quad (22)$$

где  $X$  и  $Y$  – коэффициенты радиальной и осевой нагрузки соответственно:  
 $X=0,4; Y=0,22 \operatorname{ctg} \alpha$  ;  $R, A$  – радиальная и осевая нагрузки.

Частота вращения исследуемого подшипника качения из таблицы 2 равно 600 об/мин.

При подстановке численных значений в формулу (20) было получено значение параметра  $\lambda$  равное 1,1, что соответствует режиму смешанного трения – сочетания граничного и жидкостного. При таком режиме смазки происходит изнашивание поверхности. Значит, необходимо применять смазочные материалы с такими свойствами, которые смогут обеспечить пониженный износ поверхностей трения, либо модифицировать используемый смазочный материал для его более эффективной работы при смешанном трении.

### 3.3 Расчет долговечности подшипника качения

Под долговечностью (ресурсом) отдельного подшипника качения подразумевается количество оборотов, которое одно из колец подшипника совершает относительно другого кольца до появления первых признаков контактной усталости металла на любом из колец или тел качения.

Оценка ресурса работы подшипника качения при использовании пластичного смазочного материала используется в качестве критерия работоспособности и описывается формулой [45]

$$L = a_1 a_{23} \left( \frac{C}{Q} \right)^p, \quad (23)$$

где  $a_1$  – коэффициент надежности  $a_1=1$  ;  $a_{23}$  – коэффициент смазки и материала, определяемый по номограммам и графикам;  $C$  – динамическая

грузоподъемность подшипника;  $Q$  – эквивалентная нагрузка на подшипник;  
 $p$  – степенной коэффициент (для роликовых подшипников качения  $p=3,33$ ).

Эквивалентная нагрузка рассчитывается по следующей формуле

$$Q = (X \cdot F_r \cdot K_k + Y \cdot F_a) \cdot K_\sigma \cdot K_m, \quad (24)$$

где  $X$  и  $Y$  – коэффициенты радиальной и осевой нагрузки соответственно:  
 $X=0,4; Y=1,882$  ;  $F_r, F_a$  – нагрузки радиальная и осевая соответственно  
 $F_r=7,4 \text{ кН}, F_a=0,8 \text{ кН}$  ;  $K_\sigma=1$  ;  $K_m=1$  ;  $K_k=1$ .

Подставив численные значения параметров в формулу (24), получим эквивалентную нагрузку равную 44,7 кН.

Связь между смазочной композицией, работоспособностью подшипника определяется параметром  $K$  , учитывающим исходную вязкость смазочной композиции.  $K$  определяется как отношение кинематических вязкостей:

$$K = \frac{\nu}{\nu_1}, \quad (25)$$

где  $\nu$  – вязкость смазочного материала, необходимая для создания режима гидродинамического трения;  $\nu_1$  – фактическая вязкость смазочного материала в подшипнике.

$$\nu = \exp \left[ 2,3 \cdot \frac{A \cdot \ln \nu_{50} + B - t^{1/3}}{C - D \cdot \ln \nu_{50}} \right]; \quad \nu_1 = \frac{41690}{d_m^{0,5} \cdot n^{0,824}}, \quad (26)$$

где  $d_m$  – средний диаметр подшипника;  $n$  – частота вращения подшипника;  
 $\nu_{50}$  – исходная кинематическая вязкость при 50 °C ;  $t$  – температура подшипника;  $A, B, C, D$  – эмпирические постоянные.

Для пластичного смазочного материала методика предусматривает применение в расчетах вязкость дисперсионной фазы. Берем исходную вязкость масла И-50А, как основного компонента дисперсионной фазы при 50 °C  $\nu_{50}=32-35 \text{ мм}^2/\text{с}$  .

Эмпирические постоянные находятся по таблице, в зависимости от вязкости смазочного материала при 50 °C . Для  $\nu_{50}=32-35 \text{ мм}^2/\text{с}$   $A = 0,114$ ;  $B = 5,644$ ;  $C = 3,602$ ;  $D = 0,507$ .

Температуру подшипника примем равную 60 °C

$$\nu = \exp \left[ 2,3 \cdot \frac{0,114 \cdot \ln(35) + 5,644 - 60^{1/3}}{3,602 - 0,507 \cdot \ln(35)} \right] = 15,373 \text{ мм}^2/\text{с}$$

$$\nu_1 = \frac{41690}{280^{0,5} \cdot 600^{0,824}} = 12,802 \text{ мм}^2/\text{с}$$

$$K = \frac{15,373}{12,802} = 1,2$$

Коэффициент смазки и материала  $a_{23}$  определяется по эмпирической формуле

$$a_{23} = (a \cdot K^b + c \cdot K^d) \cdot K_{\text{кн}} \cdot K_{\text{пр}} \cdot K_{\text{mn}}, \quad (27)$$

где  $a, b, c, d$  – эмпирические постоянные, принимаем  $a=0,869$ ;  $b=0,57$ ;  $c=0,375$ ;  $d=0,888$  ;  $K$  – отношение вязкостей по формуле (24);  
 $K_{\text{кн}}$  – коэффициент конструкции  $K_{\text{кн}}=1$  ;  $K_{\text{пр}}$  – коэффициент влияния присадки к смазочному материалу, определяется по данным фирмы SKF и при  $K \geq 1$ ,  $K_{\text{пр}}=1$  ;  $K_{\text{mn}}$  – коэффициент класса точности  $K_{\text{mn}} = 1$ .

$$a_{23} = (0,869 \cdot 1,2^{0,57} + 0,375 \cdot 1,2^{0,888}) \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1,4$$

Ресурс работы рассматриваемого в работе подшипника качения с пластичным смазочным материалом Литол-24, в качестве критерия работоспособности, рассчитывается по формуле (23)

$$L=1,4 \cdot \left( \frac{770 \cdot 10^3}{44,7 \cdot 10^3} \right)^{3,33} = 1,83 \cdot 10^4 \text{ ч.}$$

При применении новых смазочных материалов и технологических методов повышения срока службы деталей важно прогнозирование их ресурса. Правильно рассчитанный срок службы позволит спланировать регламентные работы, необходимое количество запасных частей и рабочих, занятых техническим обслуживанием и ремонтом техники.

### **3.4 Вывод по главе 3**

В главе приведен расчет площадки контакта ролик/кольцо, рассчитаны напряжения на контакте и геометрия площадки. Произведена оценка влияния сил трения на касательные напряжения и на скорость развития усталостных повреждений.

Был рассчитан режим смазки по параметру, предложенному Д.С. Кодниром [44], в результате чего, был определен режим смешанного трения для исследуемых подшипников качения.

Так же приведен расчет долговечности подшипника, с учетом влияния смазочного материала.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Подшипники качения, установленные в подшипниковом узле кронблока, испытывают большие нагрузки, причем эти нагрузки циклические и знакопеременные. Поэтому, подшипники качения подвергаются повышенному износу, который имеет усталостный характер. Задача повышения износостойкости подшипников качения может быть решена конструктивно, либо на стадии эксплуатации. Долговечность подшипникового узла связана с увеличением сроков службы пластичных смазочных материалов.

Основная функция ПСМ для подшипников качения – это снижение сил трения на контакте тел качения и кольцами, ввиду того, что силы трения непосредственно влияют на интенсивность износа. Большое внимание уделяется антифрикционным и противоизносным свойствам пластичных смазочных материалов, которые они приобретают за счет твердых добавок и присадок.

В процессе выполнения работы были определены наиболее эффективные компоненты, используемые в качестве добавок к пластичным смазочным материалам:

- металлоплакирующие добавки (мелкодисперсные порошки мягких металлов, например меди и их солей);
- ультрадисперсные добавки (фуллерены и фуллереновые сажи, ультрадисперсные порошки алмаза, меди);
- порошковые наполнители слоистых силикатов (порошки минералов семейства серпентинитов), однако их положительный эффект изучен лишь в теории и в ходе экспериментов.



В работе решались задачи повышения работоспособности подшипников качения, устанавливаемых в кронблоке, путем снижения усталостного износа за счет использования модифицированного пластичного смазочного материала. Решение задач связывалось с оценкой влияния процессов усталости на работу подшипников качения, определением режима смазки исследуемых подшипников качения, а так же повышением эксплуатационных свойств пластичных смазочных материалов за счет различных добавок.

Усталостный износ является основной причиной потери работоспособности подшипников качения. Обобщая многие современные теоретические представления и экспериментальные данные, можно отметить, что процессы зарождения и развития усталостных повреждений обусловлены явлениями генерирования, перемещения и накопления подвижных дефектов в теле при его циклическом деформировании. В работе приведен механизм усталостного разрушения, а так же виды износоусталостных повреждений.

Для подшипников качения характерна контактная усталость. Существует два характерных вида поверхностного разрушения при контактной усталости: образование питтингов и изнашивание отслаиванием.

Условия образования поверхностных разрушений при контактной усталости и процессы их развития зависят от схемы контактного нагружения и от условий контакта. В работе была рассчитана площадка контакта, применительно к исследуемым подшипникам качения, устанавливаемым в кронблоке, в результате чего были определены давление и напряжение на площадке контакта, а так же геометрия площадки.

Основные результаты работы сводятся к описанию процессов усталости, действующих в подшипники качения, их влиянию на работоспособность, а так же предложению путей снижения усталости за счет различных добавок в пластичный смазочный материал.

В работе было рассчитано значение параметра, по которому был определен режим смазки исследуемых подшипников качения. В результате, был определен режим смешанного трения – сочетания граничного и

жидкостного. При таком режиме смазки происходит изнашивание поверхности. Данный расчет режима смазки еще раз подтвердил необходимость снижения усталостного износа в подшипниках качения.

Как видно из расчета долговечности подшипника качения, так же приведенного в работе, ресурс работы подшипника качения напрямую зависит от смазочного материала, при этом значение имеет вязкость смазочного материала и влияние присадок в смазочном материале.

Таким образом, поставленные в работе задачи решены в полном объеме.

Применение различных добавок для улучшения свойств смазочных материалов стало основным направлением в области разработки новых ПСМ. Для подбора добавок необходимы исследования в области влияния добавок на реологические свойства смазочных материалов и на механохимические свойства материалов пары трения, а так же оценка эффективного процентного содержания добавки в смазочном материале. Одним из перспективных направлений разработки новых ПСМ являются смазочные материалы с ультрадисперсными добавками.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Алексеевский Г.В. Буровые установки Уралмашзавода. – 3-е изд., перераб. и доп. М., Недра, 1981. – 528 с.
- 2 Бобылёва, Т.В. Талевая система буровой установки: метод. указания к выполнению практических работ/ Т.В. Бобылёва. – Ухта: УГТУ, 2007. – 35 с.
- 3 Ефимченко С.И. Расчеты ресурса несущих элементов буровых установок: учебное пособие. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2001. – 171 с.
- 4 Черменский О.Н., Федотов Н.Н. Подшипники качения: Справочник-каталог. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.; ил.
- 5 Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин: Справочник. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.; ил.
- 6 Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение, 1977. — 528 с.
- 7 Повреждения подшипников качения и их причины *SKF AB*. Санкт-Петербург. – 2002. – 47 с.
- 8 Чичинадзе А.В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.; ил.
- 9 Пинегин С.В. Опоры качения в машинах. – М.: Изд. Академии наук СССР, 1961. – 155 с.
- 10 Корячкин В.П. Реологические характеристики пластичных смазок / В.П. Корячкин // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2008. - №7. – С. 25-28.

11 Жорник В.И. Эволюция структуры дисперсной фазы пластичных смазок при трибовзаимодействии и ее влияние на ресурс узлов трения / В.И. Жорник // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. Машиноведение и машиностроение. – 2014. - №11. – С. 97-105.

12 Гаркунов Д.Н. Триботехника: учебник для студентов вузов. – 2 изд., перераб. и доп.— М.: Машиностроение, 1989. — 328 с.; ил.

13 Усачев В.В. Разработка технологии упрочняющей обработки трибосопряжений природными геомодификаторами трения / В.В. Усачев, Л.И. Погодаев, Е.Ю. Крюков // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2009. - №11. – С. 8-22.

14 Пучков В.Н. Исследование влияния добавок наноструктурированных материалов на трибологические свойства смазочных масел / В.Н. Пучков, П.П. Заскалько // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2010. - №11. – С. 25-30.

15 Пат. 2277577 РФ, МПК C10M 125/02, C10M 125/26. Триботехническая добавка к смазочным маслам и пластичным смазкам / С.А. Зарьков, Н.А. Землянский, Ю.В. Гончаренко, В.А. Никитин, В.М. Петров; патентообладатель С.А. Зарьков, Н.А. Землянский, Ю.В. Гончаренко, В.А. Никитин, В.М. Петров; заявл. 24.12.04; опубл. 10.06.06, Бюл. №16. – 6 с.

16 Пат. 2319731 РФ, МПК C10M 125/02, C10M 125/10, C10M 125/26. Триботехническая добавка к смазочным маслам и пластичным смазкам / В.В. Ладиков; патентообладатель В.В. Ладиков; заявл. 15.03.07; опубл. 20.03.08, Бюл. №8. – 8 с.

17 Пат. 2443765 РФ, МПК C10M 141/08 C10M 125/02, C10M 125/22. Смазка для узлов трения подшипников качения и скольжения / В.Е. Букинов; патентообладатель ГОУ ВПО ОрелГТУ, В.Е. Букин; заявл. 28.09.10; опубл. 27.02.12, Бюл. №6. – 6 с.

18 Пат. 2457239 РФ, МПК C10M 125/02, C10M 117/04. Пластичная смазка для подшипников качения / Л.Н. Образцов, Н.К. еремееенко, В.Ю.

Блюменштейн, И.И. Образцова; патентообладатель ИУХМ СО РАН; заявл. 19.10.09; опубл. 27.04.11, Бюл. №21. – 8 с.

19 Пат. 2529461 РФ, МПК C10M 107/10, C10M 117/02, C10M 125/02, C10M 133/12. Пластичная смазка для тяжело нагруженных узлов трения качения / С.А. Савинков, А.В. Никитин, И.Е. Федоров, И.А. Евдокимов; патентообладатель ООО «Инженерная смазочная компания «МИСКОМ»; заявл. 30.08.13; опубл. 27.09.14, Бюл. №27. – 6 с.

20 Пат. 2584115 РФ, МПК C10M 125/26, C10M 125/02, B82B 1/00. Добавка к смазочным маслам и пластичным смазкам / Б.П. Струнин; патентообладатель ООО «Базис»; заявл. 16.06.14; опубл. 27.12.15, Бюл. №36. – 14 с.

21 Яхьяев Н.Я. Смазочная композиция для улучшения трибологических характеристик смазочного материала / Н.Я. Яхьяев, Ж.Б. Бегов, Ш.Д. Батырмурзаев, А.Ш. Батырмурзаев // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2010. - №7. – С. 29-32.

22 Тесакова М.В. Триботехнические характеристики смазочных композиций на основе ультрадисперсных медьсодержащих порошков, полученных электрохимическим методом / М.В. Тесакова, В.И. Парфенюк, В.А. Годлевский // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2010. - №2. – С. 22-26.

23 Погодаев Л.И. Повышение надежности трибосопряжений / Л.И. Погодаев, В.Н. Кузьмин, П.П. Дудко. – СПб.: Академия транспорта РФ. – 2001. - 304 с.: ил.

24 Додонова Д.А. Исследование антифрикционных и противоизносных свойств алюминийсодержащей смазочной композиции / Д.А. Додонова, В.Ф. Пичугин, Д.В. Лаптев // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2010. - №2. – С. 27-33.

25. Терентьев, В.Ф. Трибонадежность подшипниковых узлов в присутствии модифицированных смазочных композиций / В.Ф. Терентьев, Н.В. Еркаев, С.Г. Докшанин. Новосибирск: Изд-во «Наука» СО РАН, 2003. 142 с.

26 Витязь В.П. Модифицирование материалов и покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками. – Минск: Беларус. наука, 2011. – 527 с.

27 Витязь П.А. Формирование износостойких поверхностных структур и механизм их разрушения при трении в среде смазочного материала, модифицированного ультрадисперсными алмазографитовыми добавками. Ч. 1 Триботехнические свойства / П.А. Витязь, В.И. Жорник, В.А. Кукаренко, А.И. Камко // Трение и износ. – 2006. - №1. – С. 61-68.

28 Витязь П.А. Формирование износостойких поверхностных наноструктур трибомодифицированием в среде смазки с твердыми ультрадисперсными добавками / П.А. Витязь, В.И. Жорник, В.А. Кукаренко // Перспективные материалы 2011. – С. 248-284.

29 Синицын В.В. Пластичные смазки в СССР. – М.: Химия, 1984. 192 с.

30 Olga A. Shenderova, Dieter M. Gruen Ultrananocrystalline Diamond Synthesis, Properties, and Applications. New York, U.S.A.: William Andrew Publishing Norwich. – 2006. – 611 p.

31 Докшанин С.Г. Влияние коэффициента трения на распределение касательных напряжений для случая качения тел с проскальзыванием / С.Г. Докшанин // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. В.В. Измайлова. Вып. 6. Тверь: ТвГТУ, 2013. – 148 с. – С. 10-13.

32 Сосновский Л.А., Махутов Н.А. Трибофатика: износоусталостные повреждения в проблемах ресурса и безопасности. – 2000. – 304 с.

33 Сосновский Л.А. Основы трибофатики: Учебное пособие для студентов технических учебных заведений. Ч. I. – Гомель: БелГТУ, 2003. – 246 с.

34 Пинегин С.В. Теоретические и прикладные задачи трения, износа и смазки машин: Сборник / С.В. Пинегин, К.В. Фролов, А.В Чичинадзе. М.: Наука, 1982. – 308 с.

35 Махутов, Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность / Н.А. Махутов. В 2 ч. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, Ч. 1. 2005. – 494 с.

36 Пинегин, С.В. Трение качения в машинах и приборах / С.В. Пинегин. М.: Машиностроение, 1976. 264 с.

37 Джонсон К. Механика контактного взаимодействия: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 510 с.; ил.

38 Докшанин С.Г. Моделирование напряженного состояния в подшипнике качения при проскальзывании ролика / С.Г. Докшанин // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2016. – №4 С. 39-

39 Биргер, И.А. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.: ил.

40 Галин, Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости / Л.А. Галин. М.: Наука. Главная редакция физ.-мат. литер., 1980. – 304 с.

41 Морозов, Е.М. Контактные задачи механики разрушения / Е.М. Морозов, М.В. Зернин. М.: Машиностроение, 1999. – 544 с.

42 Лукьянов К.Ю. Моделирование напряженно-деформированного состояния контактирующих поверхностей опор качения / К.Ю. Лукьянов, А.Б. Пашенцев, В.Г. Рахчеев // Вестник транспорта Поволжья. – 2009 г. – №2 (18). – С. 49-57.

43 Щербаков С.С. Моделирование напряженно-деформированного состояния трибофатической системы ролик/кольцо / С.С. Щербаков, С.М. Бородако // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. – №1 (18). С. 80-85.

44 Коднир Д.С. Эластогидродинамический расчет деталей машин / Д.С. Коднир, Е.П. Жильников, Ю.И. Байбородов. – М.: Машиностроение, 1988. – 160 с.; ил.

45 Докшанин С.Г. Увеличение ресурса работы подшипников качения применением пластичных смазочных материалов с ультрадисперсным

алмазографитом: дис. ... канд. тех. наук / Докшанин Сергей Георгиевич. – Красноярск, 2002. – 140 с.




Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт нефти и газа  
Кафедра технологических машин и оборудования нефтегазового комплекса

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 Э.А. Петровский  
« 06 » июня 20 17 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

21.03.01.07 Эксплуатация и обслуживание технологических объектов  
нефтегазового комплекса

Снижение усталостного износа подшипников качения кронблока  
применением модифицированных смазочных материалов.

Руководитель



доцент, к.т.н.

С.Г. Докшанин

Выпускник



П.П. Павелко

Красноярск 2017